



Escuela
Politécnica
Superior

Generación de sonido audible con arrays de ultrasonidos



Grado en Ingeniería en Sonido e
Imagen en Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor:

David Ortega Patón

Tutor/es:

Jesús Carbajo San Martín

Jaime Ramis Soriano



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Julio 2021

Generación de sonido audible con arrays de ultrasonidos

Autor

David Ortega Patón

Tutor/es

Jesús Carbajo San Martín

DFISTS

Jaime Ramis Soriano

DFISTS



Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen en Telecomunicación



Escuela
Politécnica
Superior



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ALICANTE, Julio 2021

Resumen

La generación de sonido audible mediante arrays de transductores ultrasónicos es posible gracias a los efectos no lineales que exhibe el aire cuando por él se propagan ondas de alta presión sonora. Así, la emisión de una señal portadora en el rango ultrasónico modulada en amplitud, frecuencia o fase por una señal moduladora en el rango audible, producirá sonido gracias a la autodemodulación de la señal en el aire como producto de intermodulación de segundo orden a la diferencia de frecuencia de las ondas ultrasónicas emitidas. De esta manera, es posible crear un dispositivo capaz de emitir sonido con las propiedades directivas de la portadora ultrasónica: el altavoz paramétrico. Los altavoces electrodinámicos convencionales ofrecen una directividad que depende directamente del radio del transductor y de la longitud de onda radiada. Sin embargo, el altavoz paramétrico consigue una directividad que no muestra dependencia de estos parámetros, superando con creces la directividad de los altavoces convencionales, incluso cuando estos cuentan con bocinas o reflectores.

Para evaluar el comportamiento de estos dispositivos, se ha llevado a cabo la construcción y caracterización de un array de 45 transductores para su comparación con altavoces electrodinámicos convencionales en términos de directividad, sensibilidad, respuesta en frecuencia y distorsión. El array ha resultado ser apto para la generación de sonido audible con ultrasonidos, quedando demostrada la gran directividad que ofrecen los altavoces paramétricos, incluso para la baja frecuencia donde los altavoces convencionales resultan omnidireccionales. Además, este proyecto constituye un primer acercamiento a la acústica no lineal mediante el análisis de las causas de estas no linealidades y la implementación analítica de ecuaciones que modelan la propagación no lineal.

Abstract

Audible sound generation through ultrasound transducers arrays is possible due to the non-linearities shown by the air when a high-pressure wave propagates through it. Thus, the radiation of amplitude, frequency, or phase-modulated ultrasound carrier signal will lead to the generation of audible sound thanks to the self-demodulation of the wave in the air as a second-order intermodulation product. In this way, it is possible to create a device to radiate audible sound with the directivity of the ultrasound carrier: the parametric speaker. Conventional electrodynamic speakers offer a directivity that depends on their radius and the radiated wavelength. However, the parametric speaker drives out this dependence, surpassing the directivity of conventional loudspeakers even when the latter make use of horns or reflectors. To evaluate the behavior of these devices, an array of 45 transducers was built and subjected to comparison in terms of directivity, sensibility, frequency response, and harmonic distortion. The array has turned out to be suitable for the generation of audible sound with ultrasound, proving the great directivity shown by these devices, even at the low-frequency end where most electrodynamic speakers radiate in an omnidirectional way. Furthermore, this project constitutes a first approach to nonlinear acoustics through the analysis of the origin of these non-linearities and through the implementation of analytic solutions to equations that model nonlinear propagation.

Agradecimientos

Entiendo que no hay mejor agradecimiento que aprovechar las oportunidades que se le brindan a uno a lo largo de su vida. Gracias papá y gracias mamá por hacer posible que hoy este escribiendo estas líneas tras estos años de trabajo al amparo de vuestro cariño, ayuda y paciencia infinita que me habéis ofrecido durante estos 22 años y que seguiré requiriendo durante al menos otros 22. Por supuesto, el hecho de que hoy este finalizando esta etapa de mi vida, es posible gracias a las personas que te acompañan en la travesía diaria; gracias a la familia que decide compartir contigo una parte de su vida y hacer de tu día a día algo por lo que merezca la pena pertenecer a este mundo.

Gracias a mis dos tutores, Jesús y Jaime, por introducirme de lleno en el universo de la acústica que tanta curiosidad me despierta y por su labor docente y humana sin la cual este trabajo no habría sido posible. Gracias a Pedro por su inestimable ayuda a la hora de manejar el equipo del laboratorio y adaptarlo a las necesidades del proyecto, y por supuesto a los técnicos Víctor y Antonio por sus consejos y sus experimentadas manos en el mundo de la electrónica.

Por último, me gustaría agradecerme a mi mismo, puesto que lo que hace 4 años me parecían gigantes, hoy se convierten en molinos que aguardan impacientes la recogida de la cosecha.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos y metodología	2
1.3	Estado del arte	4
2	Marco Teórico	13
2.1	Acústica lineal	13
2.1.1	Ecuación de onda lineal	14
2.2	Acústica no lineal	16
2.2.1	Origen de las no linealidades	16
2.2.2	Generalización de las ecuaciones lineales	17
2.2.3	Ecuaciones de Westervelt, Burguers y KZK	18
2.3	Generación de sonido audible con ultrasonidos	21
2.3.1	El pistón radiante y la integral de Rayleigh. Campo cercano y campo lejano.	21
2.3.2	El altavoz paramétrico	25
2.3.3	Modulaciones	28
2.3.3.1	Modulaciones en amplitud (AM)	29
2.3.3.2	Modulación en frecuencia (FM)	32
2.3.3.3	Modulación en fase (PM)	32
3	Desarrollo	33
3.1	Modelo analítico - MATLAB	33
3.2	Modelo numérico - COMSOL Multiphysics	34
3.3	Construcción de un altavoz paramétrico	38
3.3.1	Requisitos mínimos necesarios	40
3.3.2	Construcción del array	41
3.4	Medidas experimentales	43
3.4.1	Campo ultrasónico	48

3.4.2	Campo audible: respuesta en frecuencia, directividad, sensibilidad y distorsión	50
4	Resultados	55
4.1	Resultados teóricos para el campo ultrasónico	55
4.2	Resultados experimentales para el campo ultrasónico	59
4.3	Resultados experimentales para el campo audible	60
4.3.1	Respuesta en frecuencia	61
4.3.2	Sensibilidad	62
4.3.3	Directividad	62
4.3.4	Distorsión armónica	65
5	Conclusiones y trabajo futuro	69
	Bibliografía	71

Índice de figuras

1.1	Concepto de intermodulación	1
1.2	Metodología del proyecto	3
1.3	Ilustración de un <i>Speaker Dome</i> para focalizar el sonido. (<i>SoundTube Secret Sound® SS30</i>)	5
1.4	Ejemplos de bocinas comerciales: (a) bocina multicelular, (b) bocina de difracción y (c) bocina de sistemas de megafonía.	6
1.5	Radiación hemiesférica de (a) una placa sin masas añadidas, (b) una placa con una masa añadida en $(x/l = -0.1, y/l = -0.1)$, (c) una placa con masa añadida en $(x/l = -0.2, y/l = -0.2)$ (Gyani Shankar Sharma, 2019)	7
1.6	Ejemplo de arrays de altavoces: (a) <i>line array</i> para sistemas de refuerzo sonoro, (b) array para WFS, y (c) array paramétrico de transductores ultrasónicos.	8
1.7	Concepto de amplificador paramétrico: (a) símbolo del diodo varactor, (b) circuito equivalente del diodo varactor, y (c) esquema eléctrico del amplificador paramétrico dividido en tres circuitos: circuito con la señal a amplificar de frecuencia ω_s con resonancia en el filtro R_s, L_s y C_s , circuito de bombeo de frecuencia ω_p con resonancia en el filtro R_p, L_p y C_p , y circuito con la señal <i>idler</i> generada a la frecuencia $\omega_s \pm \omega_p$. <i>Fuente propia</i>	9
1.8	Propuestas comerciales de altavoces paramétricos: (a) Holosonics® - AS168i, (b) DSPPA Audio - LA152SD, (c) Panphonics® - Sound Shower, (d) Spotphonics® - Spotphonics GO, (e) Ultrasonic Audio® - Acouspade, y (f) CathFlow®-SRAY.	10
1.9	Esquema de la implementación de un Phase Array.	11
2.1	Geometría utilizada para calcular la presión en el punto (r, θ) para un pistón circular plano (<i>basado en Cheeke (2002)</i>).	23
2.2	Variación de la presión con la distancia en el eje para una pistón de radio $a = 16mm$ radiando a una frecuencia $f = 40kHz$	24
2.3	Comparación de la radiación a 400 Hz un array paramétrico (izquierda) con un altavoz electrodinámico de tamaño similar (derecha) (Pompei, 2002)	26
2.4	Diagrama de bloques de la modulación DSB-AM. <i>Fuente propia</i>	29

3.1	Selección de las condiciones de la simulación en COMSOL Multiphysics: (a) selección de las dimensiones espaciales (3D), (b) selección de la interfaz física, y (c) selección del estudio a realizar.	35
3.2	Diagrama de flujo del proceso de simulación numérica en COMSOL Multiphysics.	36
3.3	Modelado numérico en COMSOL: (a) selección de los parámetros del estudio, y (b) creación de la geometría del cilindro para simular el pistón radiante. . .	36
3.4	Proceso de simulación en COMSOL Multiphysics: (a) creación del array de 9 x 5 elementos, y (b) aplicación del material "aire" al espacio infinito.	37
3.5	Proceso de simulación en COMSOL Multiphysics: (a) aplicación de la condición de contorno de pared rígida, y (b) aplicación de la condición de contorno de velocidad normal.	37
3.6	Proceso de simulación en COMSOL Multiphysics: (a) mallado de la geometría (tamaño normal), y (b) parámetros del estudio a realizar en el dominio de la frecuencia.	38
3.7	Proceso seguido en la construcción del array de ultrasonidos	39
3.8	Proceso de construcción del array: implementación de la primera aproximación en un array de 10 transductores sobre protoboard como prueba de viabilidad.	41
3.9	Diseño inicial de los arrays a construir en la segunda aproximación: (a) dimensiones del array de 9 x 5 transductores y, (b) dimensiones del array circular de 8 transductores (<i>fuentes propia</i>).	42
3.10	Proceso de construcción: (a) esquema eléctrico según la soldadura en paralelo utilizada para los 45 transductores del array rectangular de 9x5 transductores, y (b) vista trasera de la PCB con los transductores soldados.	42
3.11	Proceso de construcción: (a) imagen de la primera aproximación y, (b) soldadura de estaño en la PCB.	43
3.12	Resultado de la construcción: (a) array plano rectangular de 45 transductores y, (b) array plano circular de 8 transductores (<i>fuentes propia</i>).	43
3.13	Esquema de los parámetros de entrada y salida de la función generar_tonos_PAL.m. <i>Fuente propia</i>	45
3.14	Espectros de las modulaciones empleadas: (a) DSB, (b) SRAM, (c) MAM1, (d) MAM2, (e) FM, y (f) PM.	46
3.15	Amplificadores utilizados en la experimentación con los arrays de ultrasonidos: (a) Amplificador InterM-M55, y (b) amplificador STK4152II	47
3.16	(a) amplificador descartado, y (b) acondicionador de señal utilizado en todos los montajes experimentales.	48

3.17	Montaje experimental para la medida del campo ultrasónico: (a) esquema, y (b) imagen del setup.	49
3.18	Medición de una línea axial de 50 cm a la frecuencia de 40 kHz: (a) detalle del montaje , y (b) vista del montaje.	50
3.19	Altavoces electrodinámicos utilizados en el estudio comparativo: (a) PASCO WA-9900 de 13 cm de diámetro, y (b)VISATON K-50 de 5 cm de diámetro. .	51
3.20	Espectro completo medido a 1 m del array de 9x5 para la emisión de un tono de 1 kHz en modulación DSB.	51
3.21	Setup experimental para medir la directividad.	52
3.22	Esquema del montaje experimental para medir la respuesta en frecuencia de los dispositivos sometidos al estudio comparativo.	53
4.1	Organización de los resultados	55
4.2	Resultados para la solución a la ecuación de Burguers resulta por el método de las aproximaciones sucesivas.	56
4.3	Resultados del modelo analítico: campo de presión radiado por un solo pistón. .	57
4.4	Resultados teóricos del campo ultrasónico: (a) modelo analítico, y (b) modelo numérico.	57
4.5	Ampliación del plano de cálculo para los modelos analítico (MATLAB) y numérico (COMSOL).	58
4.6	Resultados de nivel de presión en el eje de los modelos analítico y numérico. .	58
4.7	Resultados experimentales del campo ultrasónico.	59
4.8	Resultados de la presión en el eje.	60
4.9	Resultados experimentales del campo audible: (a) array de 9x5 elementos, y (b) altavoz electrodinámico PASCO.	61
4.10	Resultados para la respuesta en frecuencia del array de 9x5 transductores. . .	61
4.11	Resultados de sensibilidad para el array de 9x5 elementos para las modulaciones implementadas.	62
4.12	Resultados de directividad del array de 9x5 transductores para las modulaciones empleadas.	63
4.13	Diagrama polar de directividad para el altavoz electrodinámico PASCO WA990 a 1 kHz y 1 m.	63
4.14	Resultados de directividad de los altavoces electrodinámicos.	64
4.15	Resultados de directividad del array de 9x5 transductores (Ángulo Vs. Frecuencia Vs. Nivel de presión normalizado).	64
4.16	Comparativa del índice de directividad obtenido para cada modulación y para el altavoz convencional.	65

- 4.17 Resultados del índice de distorsión armónica total para las modulaciones en amplitud, frecuencia y fase: (a) DSB, (b) MAM1, (c) SRAM, (d) FM, y (e) PM. 66
- 4.18 Comparativa entre la distorsión armónica producida por las modulaciones: (a) distorsión para $m = 1$, desviación de frecuencia de 1 kHz y desvío de fase de π , y (b) distorsión mínima obtenida para cada modulación. 67
-

Índice de tablas

3.1	Parámetros del modelo analítico de MATLAB para la implementación de la integral de Rayleigh.	34
3.2	Parámetros del modelo analítico de la solución a la ecuación de Burgers. . . .	35
3.3	Características del montaje experimental: (a) medida del campo ultrasónico, y (b) medida de presión en el eje.	49
3.4	Características de la medida de directividad	52

1 Introducción

El proyecto que se desarrolla a lo largo de esta memoria se basa en el análisis de un tipo de altavoz: **el altavoz paramétrico**, cuyas propiedades directivas superan con creces a las de los altavoces convencionales, incluso con el uso de bocinas o reflectores para focalizar el sonido. Este altavoz se beneficia del fenómeno de intermodulación ilustrado en la figura 1.1; la interacción de dos ondas ultrasónicas (fundamentales o primarias) producen una nueva de frecuencia igual a la diferencia de frecuencias como producto de intermodulación de segundo orden.

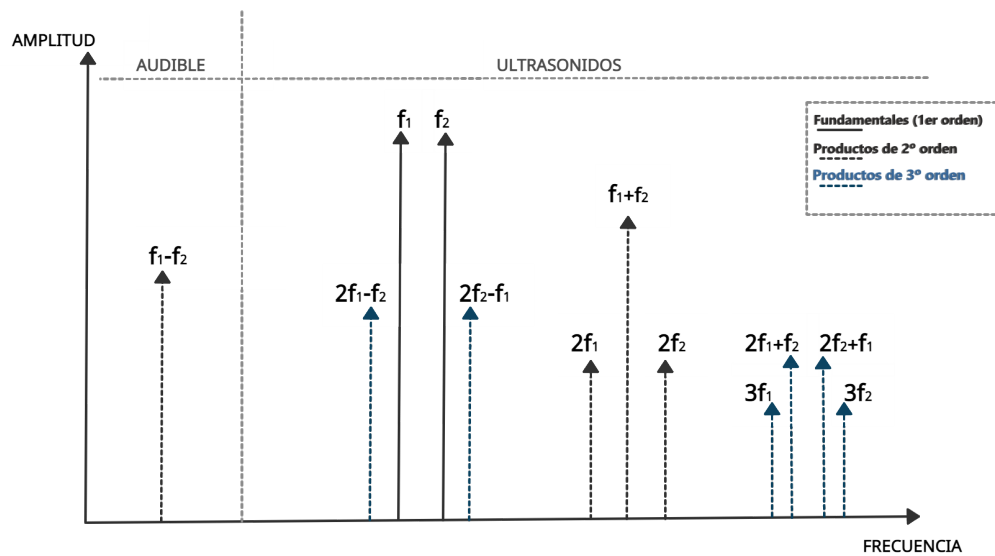


Figura 1.1: Concepto de intermodulación

1.1 Motivación

El uso de altavoces convencionales para la reproducción de audio está ampliamente extendido y consolidado, ya que en la mayoría de aplicaciones se requiere de un campo acústico homogéneo que pueda ser percibido por el mayor número de personas posible. Este tipo de altavoces, la mayoría electrodinámicos, ofrecen una directividad que depende directamente de

su radio y de la longitud de onda radiada, limitando así el comportamiento directivo a la alta frecuencia. Sin embargo, es posible eliminar esta dependencia y conseguir un comportamiento directivo incluso en la baja frecuencia mediante arrays de transductores ultrasónicos. Este fenómeno es posible gracias a las propiedades no lineales que exhibe el aire cuando por él se propagan ondas acústicas de alta presión. Las no linealidades del aire son las responsables de múltiples efectos como la creación de ondas de choque *del inglés, shock*, de armónicos y subarmónicos, o la aparición de *beats* o pulsaciones cuando dos ondas de frecuencias próximas interactúan en un medio. El array de ultrasonidos se beneficia de este último efecto y es capaz de generar sonido audible mediante la interacción de ondas de frecuencias superiores a los 20 kHz, con la ventaja adicional de que el sonido audible generado contará con las mismas propiedades directivas que las de las ondas ultrasónicas que lo generan, resultando estos dispositivos de gran interés como objeto de investigación.

1.2 Objetivos y metodología

Este trabajo comprende los siguiente objetivos generales:

- Comprender los fundamentos teóricos de la generación de sonido audible con un array de ultrasonidos, así como sus principales ventajas e inconvenientes.
- Implementar modelos de predicción acústica para estudiar la radiación de los array de ultrasonidos.
- Construir un array de ultrasonidos apto para la generación de sonido audible.

Y los siguiente objetivos específicos:

- Estudiar las bases de la propagación no lineal de las ondas de presión en el aire y sus consecuencias como la generación de componentes espectrales ausentes en la señal original (armónicos) o la creación de ondas de *shock*.
- Implementar modulaciones en amplitud, frecuencia y fase para la generación de sonido audible con arrays de ultrasonidos.
- Realizar un estudio comparativo de las predicciones analíticas (MATLAB) y numéricas (COMSOL Multiphysics) contrastadas con medidas experimentales.

La estructura de esta memoria sigue las líneas del método científico contando con partes claramente diferenciadas en las que se desarrolla el proceso de observación, experimentación y extracción de conclusiones. Así, este trabajo se divide en las siguientes partes: (i) una

introducción a modo de contextualización del trabajo a realizar, (ii) un marco teórico en el que se concentra toda la teoría general y aplicada a los arrays paramétricos, (iii) un desarrollo en el que se implementan modelos de predicción acústica y se construye un array paramétrico para su caracterización, y (iv) un análisis de los resultados obtenidos en el que se valoran todas las medidas realizadas, evaluando el array construido.

La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo comprende las fases ilustradas en la figura 1.2.

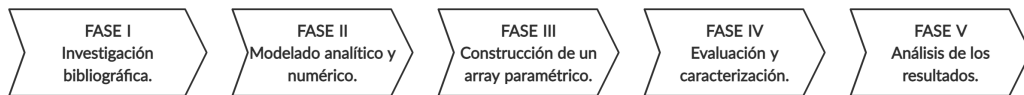


Figura 1.2: Metodología del proyecto

Cada una de las fases contempla los siguientes puntos:

- **Fase I** → Investigación bibliográfica
 - Búsqueda y recopilación de trabajos acerca de acústica lineal y no lineal así como de la teoría desarrollada específicamente para los arrays de generación paramétrica.
 - Investigación contextual sobre los productos comerciales disponibles, sus aplicaciones prácticas y los posibles efectos en la salud por la larga exposición a ultrasonidos.
 - **Fase II** → Modelos analítico y numérico
 - Implementación de la integral de Rayleigh para predecir el campo acústico ultrasónico en MATLAB.
 - Implementación de un modelo numérico por el método de elementos de contorno (*Boundary Elements Method*) en COMSOL Multiphysics.
 - **Fase III** → Construcción de un array paramétrico
 - Establecimiento de los criterios y condiciones de diseño.
 - Estudio de las etapas de generación, amplificación, radiación y captación.
 - **Fase IV** → Evaluación y caracterización del array construido
 - Medidas de directividad, sensibilidad, respuesta en frecuencia y distorsión
 - Comparativa con altavoces electrodinámicos convencionales.
 - **Fase V** → Análisis de los resultados
 - Post-procesado de datos y evaluación de los datos medidos.
-

Las fases IV y V forman parte de un proceso iterativo en el que se modifican algunos parámetros de diseño en función de los resultados obtenidos a fin de mejorar la calidad final del array construido.

1.3 Estado del arte

Desde la invención del teléfono a finales del siglo XIX, son múltiples los sistemas y tecnologías de transducción desarrollados hasta la actualidad, capaces de convertir la energía eléctrica en energía acústica en forma de ondas mecánicas radiadas al medio adyacente y viceversa. Son de sobra conocidos los transductores electrodinámicos que utilizan el principio de inducción electromagnética para generar el movimiento de un diafragma, o los transductores electrostáticos, que hacen uso de la fuerza electrostática resultante de variar la carga entre dos placas. Además, fruto del avance tecnológico y científico producido en la 1ª Guerra Mundial por la increíble demanda en dispositivos para la detección de submarinos sumergidos y de medios comunicación confiables en ambientes ruidosos, se desarrollan nuevos transductores como los que hacen uso del efecto piezoeléctrico directo o inverso para producir o captar sonido respectivamente. En la actualidad, la acústica es toda una cuestión de interés general en la vida cotidiana; la tendencia hacia la construcción de casas bien aisladas a la vez que silenciosas, la demanda laboral hacia lugares de trabajo seguros y cómodos desde el punto de vista acústico y la integración de la acústica en la construcción toman cada vez más protagonismo en los proyectos de ingeniería y arquitectura.

A la hora de evaluar el comportamiento o la calidad de los sistemas de reproducción de audio, es usual encontrar términos como la respuesta en frecuencia, la sensibilidad, la potencia eléctrica y acústica, la distorsión armónica o la directividad, entre otros. Estas características dependerán en cada caso del tipo de transductor que se utilice y de la aplicación a la que el equipo este destinado, pudiendo ser controladas o modificadas mediante el uso de técnicas específicas.

Los sistemas de reproducción de audio convencionales, mayoritariamente basados en transductores electrodinámicos, ofrecen una directividad que depende directamente del producto del radio de la fuente por la longitud de onda de la frecuencia radiada, por lo que cuanto menor sea la longitud de onda radiada en comparación con el radio del diafragma, mayor será la directividad de la fuente a esa frecuencia. Esta relación limita el comportamiento directivo de una fuente convencional a la alta frecuencia, contando la baja frecuencia con un patrón de radiación de tendencia omnidireccional. Debido a la creciente preocupación por la reducción de la contaminación acústica, sobre todo en espacios en los que coexisten multitud de personas, se requiere de precisión en el control espacial del sonido, pudiendo acotar la radiación

sonora en zonas concretas del espacio y evitar la larga exposición a ruidos y sus evidentes efectos adversos en la salud de las personas (OMS, 2011) (Geravandi y cols., 2015). Existen numerosas situaciones para las que conviene modificar el patrón de directividad de un sistema de reproducción de audio, por ejemplo, (i) en un sistema de refuerzo sonoro de un concierto para evitar la radiación posterior de las cajas de graves hacia el escenario (*end-fire array*, sistema cardioide), (ii) en un sistema de megafonía dirigido al público de una zona concreta como en estaciones de transporte público, (iii) para la individualización del audio a través de auriculares, (iv) para evitar el filtro peine en la agrupación de fuentes, o (v) en aplicaciones de audio 3D. El control de la directividad de una fuente es posible gracias a un gran número de técnicas desarrolladas para este propósito, contando con una amplia cantidad de trabajos relacionados con dicho control que se resumen y agrupan a continuación como:

Sistemas de control mecánico-pasivo

Son aquellos que hacen uso de materiales o estructuras que añadidos o acopladas a un transductor modifican su directividad en el rango de frecuencias para el que se diseñan. Entre los más utilizados en la industria, se encuentran los reflectores curvos de la figura 1.3 llamados *domes* en inglés, los cuales se basan en el uso de un reflector parabólico o esférico de gran tamaño con un transductor situado en su punto focal para producir una focalización del sonido en una determinada región. En la práctica esta focalización se limita al campo cercano y a la alta frecuencia, ya que las frecuencias más bajas necesitarían de un reflector de dimensiones comparables con su longitud de onda, lo que impide usar este tipo de reflectores para la focalización a media y larga distancia, tal y como apunta Pompei (2002) en su trabajo.



Figura 1.3: Ilustración de un *Speaker Dome* para focalizar el sonido. (*SoundTube Secret Sound® SS30*)

Una solución aún más extendida y utilizada que la anterior es el uso de guías de onda en forma de bocinas, los llamados altavoces de radiación indirecta. Las bocinas, según la descripción de Leo L. Beranek (2012), son elementos de sección variable que actúan como transformadores acústicos capaces de ajustar la impedancia entre el elemento

radiante y el medio adyacente para conseguir la máxima transferencia de potencia y una radiación en forma de frentes de onda planos. Además, la bocina es un elemento de control de la directividad ya que radia en un ángulo definido por la apertura angular de la boca de la bocina (la terminación de mayor sección). Las bocinas, están acopladas a un motor o cámara de compresión en la que reside el transductor electrodinámico. Existen perfiles con soluciones analíticas exactas como el cónico, el parabólico o el exponencial y varios tipos de bocinas según su construcción como las multicelulares, las radiales (sectoriales), las bocinas de difracción o las de directividad constante (ver Figura 1.4). En la práctica, las mejores bocinas ofrecen una directividad constante a partir de una determinada frecuencia que dependerá de las características geométricas de la bocina, dadas por sus parámetros y condiciones de diseño, por lo que no resultan efectivas para el control directivo en baja frecuencia limitando su uso a los *tweeters* de los sistemas multivía.

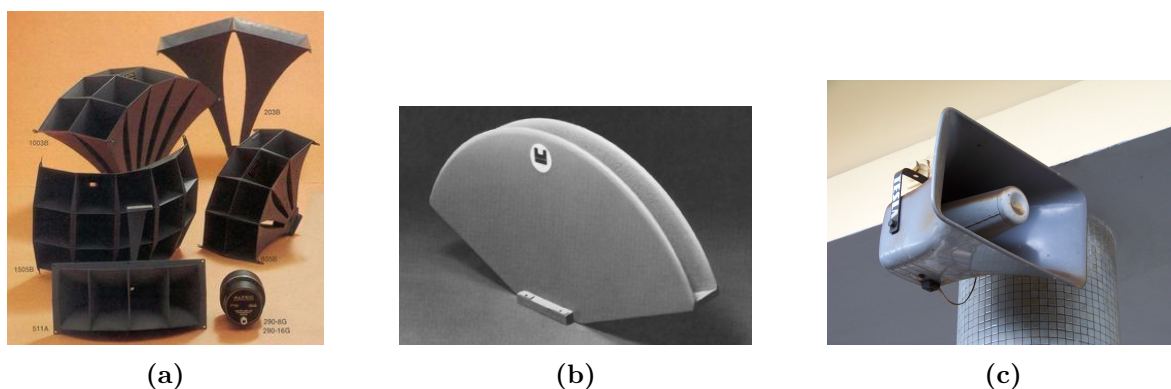


Figura 1.4: Ejemplos de bocinas comerciales: (a) bocina multicelular, (b) bocina de difracción y (c) bocina de sistemas de megafonía.

Otras técnicas de control de directividad, dirigidas también al control de la baja frecuencia, son las basadas en añadir masas puntuales repartidas en la estructura del elemento radiante (Gyani Shankar Sharma, 2019). Estas técnicas se apoyan en que cada modo de vibración de la estructura exhibe distintas características en la radiación. Por ejemplo, para una placa circular simplemente soportada, el primer modo tiene una radiación dominante en la dirección normal a la placa, mientras que el segundo modo cuenta con una mínima radiación en la dirección normal. En la figura 1.5 se observa el efecto de la masa añadida, modificando el patrón omnidireccional inicial hacia uno más directivo. De manera similar, Christensen y Olhoff (1998) optimizan tanto la posición de las masas concéntricas añadidas al diafragma de un transductor electrodinámico como la geometría y espesor del propio diafragma a fin de modificar su patrón directivo. A pesar

de modificar el patrón de directividad, incluso para los primeros modos de vibración, la implementación práctica de este tipo de altavoces no resulta viable ya que requieren de diseños complejos y de poca versatilidad, por lo que no resultan interesantes para la industria del audio.

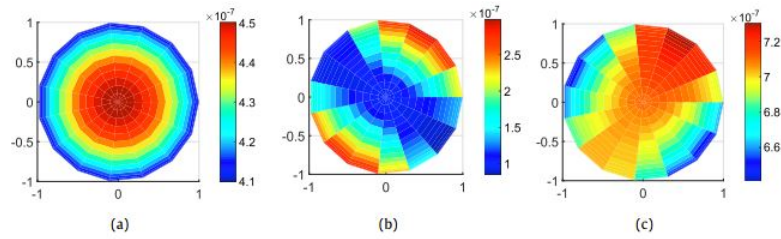


Figura 1.5: Radiación hemisférica de (a) una placa sin masas añadidas, (b) una placa con una masa añadida en $(x/l = -0.1, y/l = -0.1)$, (c) una placa con masa añadida en $(x/l = -0.2, y/l = -0.2)$ (Gyani Shankar Sharma, 2019)

Sistemas de fuentes agrupadas (*arrays*).

Los métodos anteriormente descritos modifican la directividad de los transductores de manera individual, es decir, actúan sobre un único transductor para variar su patrón directivo. Los procedimientos que se describen a continuación se apoyan en el concepto de arreglo o *array*. Un *array* (ver figura 1.6) no es más que una agrupación de transductores que actúan en conjunto, pudiendo modelarse dicho *array* como un único elemento radiante con características acústicas propias, utilizados tanto con emisores como con receptores. El mero hecho de agrupar varias fuentes, bien a lo largo de una línea o en un plano, modificará tanto la respuesta en frecuencia como la directividad del conjunto de manera pasiva. Esto dependerá de la longitud efectiva del conjunto de fuentes, la separación entre fuentes consecutivas, la frecuencia radiada y el tamaño del elemento radiante (diafragma) principalmente. Actualmente se pueden observar múltiples configuraciones en *array* en sistemas de refuerzo sonoro utilizados en conciertos (*line array*) o incluso en aplicaciones de audio espacial o audio envolvente como en el campo del *Wave Field Synthesis* (Ortega, 2008). La inmensa mayoría de estos *arrays* utilizan transductores electrodinámicos preparados para radiar en el rango de frecuencias audibles (20 Hz - 20 kHz).

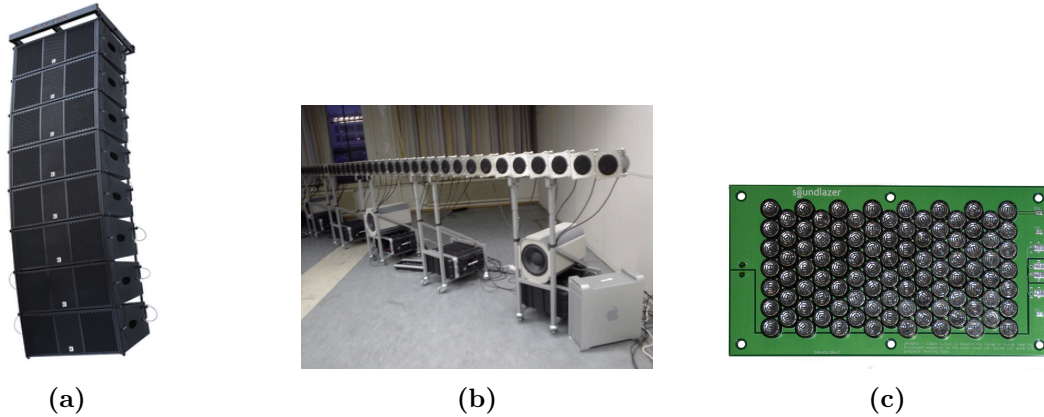


Figura 1.6: Ejemplo de arrays de altavoces: (a) *line array* para sistemas de refuerzo sonoro, (b) array para WFS, y (c) array paramétrico de transductores ultrasónicos.

El uso de arrays está ampliamente extendido en el campo de los ultrasonidos, destacando su uso en medicina como las técnicas HIFU (*High Intensity Focused Ultrasound*). La propagación de los ultrasonidos en los tejidos, que es no lineal, ocupa un primer plano para muchos centros de investigación como el UMIL de la UPV en España (*Ultrasound Medical and Industrial Laboratory*) con la aplicación de técnicas de holografía acústica para el estudio no invasivo del cuerpo humano (Jiménez-Gambín y cols., 2019) entre otros artículos de interés.

Fuera del ámbito medicinal, existen otro tipo de arrays denominados "Parametric Acoustic Array" o "Parametric Array Loudspeaker" (ver figura 1.6c), en adelante altavoz o array paramétrico, que utiliza transductores piezoeléctricos y señales de ultrasonidos moduladas para producir sonido en el rango audible de manera muy directiva y en un amplio rango de frecuencias. Este dispositivo se basa en la generación paramétrica y recibe su nombre del concepto de amplificador paramétrico de bajo ruido, utilizados en la amplificación de señales satelitales en los años 70 como sustitutos de los máseres de 4 GHz enfriados por helio. Estos amplificadores se benefician de las no linealidades que exhibe un diodo varactor o diodo varicap (dispositivo electrónico de capacitancia variable controlada por voltaje, ver figura 1.7a/b) alimentado por la señal a amplificar y por una señal cuadrada de bombeo (del inglés, *pump*) para conseguir una nueva señal cuya frecuencia (denominada *idler*) sea igual a la suma (o a la resta) de las señales que alimentan el diodo varactor. Este circuito, que se puede observar en la figura 1.7c, consigue crear una resistencia negativa teórica en el diodo varactor, lo cual se traduce en una amplificación de la señal en la práctica (Edrich, 1976).

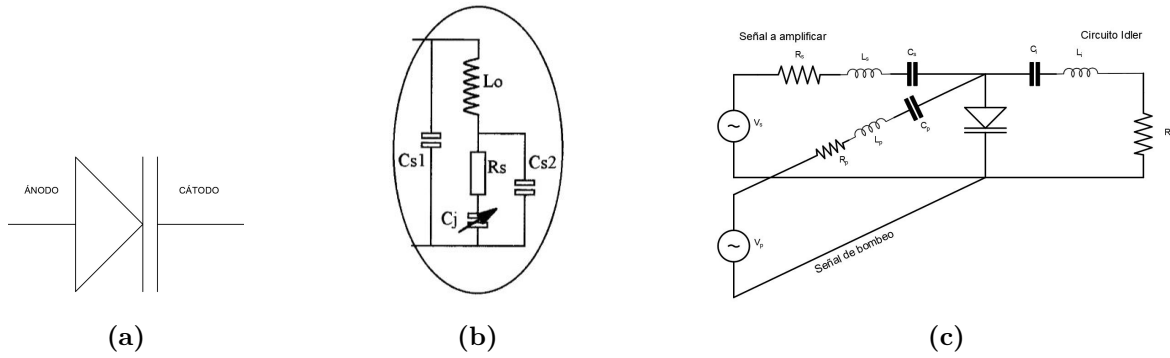


Figura 1.7: Concepto de amplificador paramétrico: (a) símbolo del diodo varactor, (b) circuito equivalente del diodo varactor, y (c) esquema eléctrico del amplificador paramétrico dividido en tres circuitos: circuito con la señal a amplificar de frecuencia ω_s con resonancia en el filtro R_s , L_s y C_s , circuito de bombeo de frecuencia ω_p con resonancia en el filtro R_p , L_p y C_p , y circuito con la señal *idler* generada a la frecuencia $\omega_s \pm \omega_p$. *Fuente propia*

La directividad tan estrecha que ofrecen este tipo de dispositivos no es comparable con ninguno de los sistemas antes mencionados ya que éstos últimos consiguen minimizar la energía de los lóbulos laterales. Se espera que estos dispositivos sean utilizados en un gran rango de aplicaciones como la escucha individualizada de música, sistemas de anuncios y en lugares que carezcan de barreras físicas para delimitar el sonido. A las primeras observaciones por parte de Westervelt (1957) sobre la interacción no lineal de ondas acústicas subacúaticas en el rango ultrasónico (primarias) para producir nuevas ondas (secundarias) en el rango audible, le suceden multitud de trabajos relacionados para explicar y explotar este fenómeno. H. O. Berkta (1971) publicó un artículo en el que continúa con el desarrollo de Westervelt de una manera teórica para una propagación esférica o cilíndrica de las ondas primarias bajo el agua. Bennett y Blackstock (1975) estudian la aplicación de este efecto para la radiación en aire y finalmente Yoneyama y cols. (1983) proponen la idea base del altavoz paramétrico. Además, es decisivo el trabajo de Pompei (2002), fundador de la empresa *Holosonics*, en el que desarrolla un altavoz paramétrico con muy bajos índices de distorsión armónica en un amplio rango de frecuencias y con suficiente niveles de presión como para ser escuchados con claridad, posibilitando la reproducción de audio de calidad y solidificando los principios teóricos de este fenómeno utilizados posteriormente por multitud de empresas para la fabricación de productos comerciales (ver figura 1.8). Sin embargo, todos estos trabajos de investigación destacan dos principales inconvenientes inherentes al altavoz paramétrico: (i) la distorsión armónica, como subproducto del preprocesado de la señal y a consecuencia de la interacción no lineal de las ondas sonoras de alta presión en el aire (intermodulación), y (ii) la pobre respuesta en baja frecuencia. Además, existen unos

requisitos mínimos a tener en cuenta en la construcción de un altavoz paramétrico: (i) radiar ondas de presión en el rango ultrasónico de una amplitud de al menos 100 dB para evidenciar los efectos no lineales del aire, (ii) necesidad de transductores con ancho de banda suficiente como para reproducir señales de audio moduladas y (iii) técnicas de procesamiento de señal para evitar la distorsión armónica.

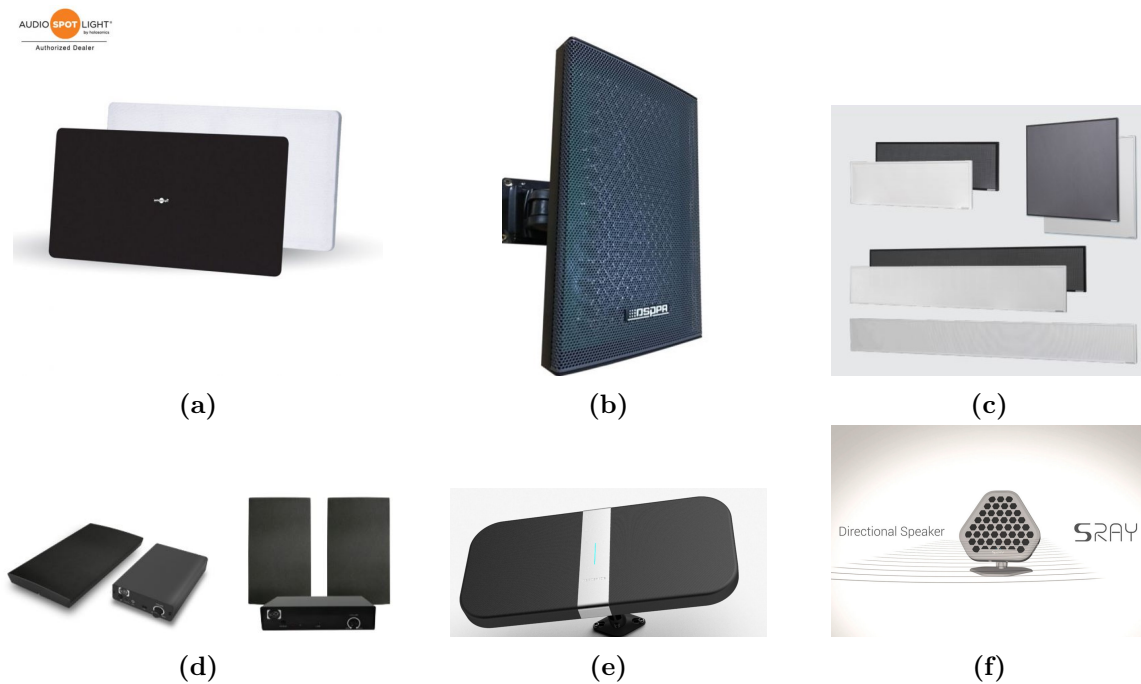


Figura 1.8: Propuestas comerciales de altavoces paramétricos: (a) Holosonics® - AS168i, (b) DSPPA Audio - LA152SD, (c) Panphonics® - Sound Shower, (d) Spotphonics® - Spotphonics GO, (e) Ultrasonic Audio® - Acouspade, y (f) CathFlow®-SRAY.

Sistemas de control electrónico.

En un array de emisores, cada uno de los elementos que lo compone puede ser controlado de manera individual, pudiendo así individualizar la señal de cada elemento radiante como se muestra en la topología de la Figura 1.9. Así, se puede modificar la amplitud, la fase o el espectro de la señal que se envía a cada emisor. Cuando un array funciona en base a la manipulación electrónica de la señal emitida, este se denomina Phase Array. El control individual de estos parámetros en cada transductor permite gobernar la dirección del frente de onda radiado dando lugar a efectos como la focalización o a el *beamforming* o *beamsteering* (Shigeto Takeoke, 2010). Así, se consigue dirigir el lóbulo principal hacia puntos o regiones concretas del espacio. Esta técnica, aplicada en el contexto de los altavoces paramétricos, permite además la creación de rayos sonoros con un ancho de haz menor que el de los sistemas convencionales, dando lugar a espacios

de sonido acotados y bien definidos conocidos como *sound spotlight* por su intuitiva analogía con la focalización de la luz.

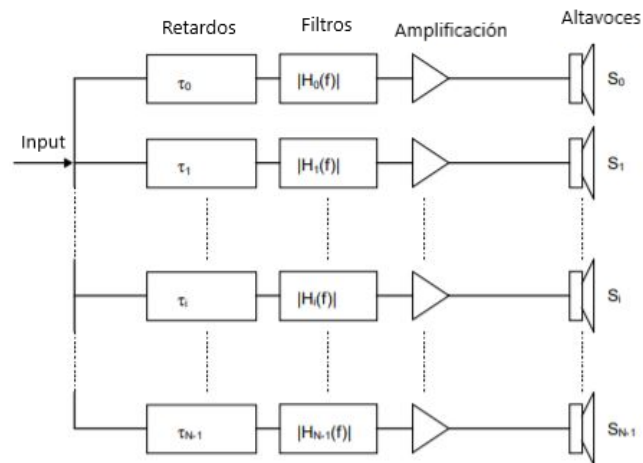


Figura 1.9: Esquema de la implementación de un Phase Array.

2 Marco Teórico

La generación de sonido audible mediante la interacción de señales de ultrasonidos es posible gracias a las no linealidades que exhibe el aire al propagarse por él ondas de altos niveles de presión. Esta interacción no lineal tiene su origen en la variación de la velocidad del sonido en su propagación, por lo que resulta de gran interés conocer la física en la que se sustenta este fenómeno: la acústica no lineal. Así, esta sección parte de las bases de la acústica lineal, válidas para fenómenos de baja amplitud (*small-signal*, en inglés), para obtener una ecuación en derivadas parciales que modele la propagación de una onda de presión, contemplando los efectos termo-viscosos que originarán las no linealidades del medio: la ecuación KZK. Además, se estudiará la teoría no lineal particularizada para el fenómeno de la generación de sonido audible con ultrasonidos así como las condiciones necesarias para que se produzca dicho fenómeno.

2.1 Acústica lineal

La base matemática y física que rige el comportamiento de las ondas acústicas en un fluido se encuentra en las ecuaciones generales de la mecánica de fluidos, también llamadas ecuaciones constitutivas. A partir de estas, se obtiene la ecuación en derivadas parciales que modela la propagación de las ondas acústicas en un medio lineal junto a su solución analítica.

Cuando una superficie como el diafragma de un altavoz, entra en vibración en contacto con un medio elástico, por este se propagará una perturbación causando una alteración local de la presión a consecuencia del desplazamiento de las partículas del medio. A esta perturbación mecánica, cuando es percibida por alguna persona, se le denomina sonido. Como los fenómenos acústicos que implican sonido son, en la gran mayoría de aplicaciones, de pequeña amplitud, su análisis puede basarse en una teoría linealizada: la acústica lineal. Esta teoría hace uso del principio de superposición, que puede ser descrito como (Rossing, 2007):

$$\Gamma(af_1 + bf_2) = a\Gamma(f_1) + b\Gamma(f_2), \quad (2.1)$$

donde f_1 y f_2 son dos "causas" y la función $\Gamma(f)$ predice el efecto de dichas causas, siendo a y b dos constantes arbitrarias. En el caso lineal, por lo tanto, duplicar la causa duplica el

efecto, y de la misma manera, el efecto conjunto de dos causas se descompone como la suma del efecto de cada causa de manera individual. Este principio se aplica convenientemente cuando se pretende conocer la presión en un punto de un campo acústico complejo, formado por dos o más fuentes. En este caso, la presión en dicho punto será igual a la suma de las contribuciones de cada fuente de manera individual, de acuerdo con el principio de superposición. Sin embargo, esta linealización debe ser tomada siempre como una aproximación, ya que en el entendimiento de los aspectos no lineales reside la verdadera exactitud.

En un gas, toda fuerza de compresión producirá necesariamente un desplazamiento proporcional de las partículas del mismo. Este desplazamiento dará lugar a colisiones entre las moléculas de aire, bien entre ellas, bien con las paredes del recipiente que lo contenga, resultando en incrementos locales de presión. La presión se define como fuerza por unidad de superficie, o, según Newton, como la velocidad de variación de la cantidad de movimiento por unidad de área. Si este desplazamiento se produce lentamente, es decir, la velocidad de partícula $|\vec{v}|$ es mucho menor que la velocidad de propagación del sonido c_0 ($|\vec{v}| \ll c_0$), la compresión es isotérmica, por lo que las variaciones de presión se producen a temperatura constante y hay tiempo para que el calor generado en el gas durante la compresión pueda pasar a otras partes del gas, o a las paredes del recipiente que lo contenga. En cambio, si la variación del volumen es rápida, la temperatura se eleva en la compresión del gas y desciende al expandirse, no habiendo tiempo suficiente para que el calor se transmita al medio adyacente. Además, la variación de la temperatura que acompaña a la compresión provoca un aumento de la cantidad de movimiento transferida por colisión. Es por lo tanto, un proceso sin transferencia de calor (adiabático) y reversible (Lawrence E. Kinsler, 2000).

En los fluidos reales, el proceso adiabático no es perfecto y el fluido posee cierta viscosidad, estas consideraciones introducirían términos disipativos en las ecuaciones anteriores, dando lugar a las no linealidades que serán estudiadas más adelante en este trabajo. Así, las ecuaciones que definen la acústica lineal pueden ser derivadas de las ecuaciones de un fluido compresible ideal conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes.

Para el desarrollo que sigue, se define: (i) la velocidad local total $v = v_0 + v_a$ de una partícula de aire como el incremento de velocidad v_a aplicado a la velocidad estática $v_0 = 0m/s$, (ii) la densidad local total $\rho = \rho_0 + \rho_a$ como el resultado del incremento de densidad ρ_a en la densidad ambiente ρ_0 , y (iii) la presión local total $P = P_0 + p_a$ como el resultado del incremento de presión p_a producido por la onda acústica en la presión estática del medio P_0 .

2.1.1 Ecuación de onda lineal

Para obtener una ecuación lineal que modele la propagación de una onda acústica en un fluido, será necesario recurrir y relacionar convenientemente las ecuaciones generales de la

mecánica de fluidos, que consideran la conservación de masa y energía, expuestas brevemente a continuación (Lawrence E. Kinsler, 2000).

Ecuación de estado.

En general para un fluido, la relación entre la presión y la densidad ρ es no lineal. Sin embargo, se puede aproximar esta relación y mantener los términos de primer orden siempre que $v_a \ll c_0$ y $p_a \ll \rho_0 c_0^2 \approx 197$ dB SPL, tal que

$$\rho_a \simeq \frac{p_a}{c_0^2} \quad (2.2)$$

Ecuación de continuidad.

La ecuación de continuidad es una expresión matemática que expone que la masa total de un cubo de gas de volumen dV debe permanecer constante ante la variación del volumen, por lo que también es llamada ecuación de conservación de masa, pudiendo expresar dicha relación como

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (2.3)$$

donde $\vec{\nabla}$ representa la derivada parcial en cada una de las coordenadas cartesianas.

Ecuación de movimiento (ecuación de Euler).

A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes se deriva la ecuación lineal de movimiento, válida para fenómenos de pequeña amplitud

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p_a \quad (2.4)$$

Finalmente, para obtener la ecuación de onda que rige el comportamiento de la acústica lineal, será necesario combinar las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4. Así, tomando la primera derivada en el tiempo de la ecuación de continuidad $\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \nabla \cdot (\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}) = 0$, y la divergencia de la ecuación de Euler $\nabla \cdot (\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}) = -\nabla^2 p_a$, la combinación de ambas resulta en la ecuación de propagación de onda lineal

$$\vec{\nabla}^2 p_a = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

donde $\nabla^2 p_a = \frac{\partial^2 p_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p_a}{\partial z^2}$ es el operador laplaciano.

2.2 Acústica no lineal

Como se detalla en la sección anterior, la acústica lineal ignora por completo cualquier efecto de origen no lineal, aplicando el principio de superposición para el cálculo de los campos acústicos y la condición de que las ondas acústicas son infinitamente pequeñas (*small-signal*). Sin embargo, cuando, por ejemplo, dos ondas de distinta frecuencia y amplitud finita se propagan en el mismo medio, cada una de las ondas se ve afectada por la otra resultando en lo que se conoce como dispersión del sonido por el sonido (*scattering of sound by sound*). Esta interacción producirá nuevas ondas como sus armónicos u ondas con la suma o diferencia de las frecuencias iniciales debido a las no linealidades del medio. Por lo tanto, la base física en la que se sustenta el fenómeno de la generación de sonido audible con ultrasonidos es la acústica no lineal. En el aire, estas no linealidades comienzan a ser apreciables cuando las ondas acústicas superan los 110 dB de nivel de presión sonora. Existen multitud de efectos derivados de la propagación de una onda en un medio que exhibe propiedades no lineales como la creación de armónicos y subarmónicos, la producción de ondas de *shock* o la autodemodulación de ondas moduladas (*self-demodulation*). Además, la comprensión de los efectos no lineales posibilita multitud de aplicaciones muy importantes en el ámbito de la medicina como el diagnóstico por imagen, o en los ultrasonidos terapéuticos de alta intensidad (HITU).

2.2.1 Origen de las no linealidades

El concepto de no linealidad se puede entender observando la propagación de una onda en la superficie del agua (una ola): a medida que se aleja del punto en el que se produce, esta comienza a deformarse creando una especie de escalón o discontinuidad para finalmente romperse. Este fenómeno se debe a que el punto más alto de la ola viaja más rápido que los demás puntos de esta. Si bien en el aire la onda acústica no puede romperse, sí que pueden darse ese tipo de discontinuidades, conocidas como ondas de choque (del inglés, *shock*). Por lo tanto, el primer factor que origina las no linealidades es que la velocidad de propagación del sonido no se mantiene constante en todos los puntos del frente de onda. Esta variación de la velocidad de propagación se debe a: (i) la convección, ya que el movimiento de las partículas del medio contribuye a la velocidad de propagación, y (ii) la relación no lineal entre la presión y la densidad. La combinación de estos dos factores resulta en lo que se conoce como parámetro de no linealidad β que será estudiado más adelante en esta sección. Así, la velocidad de propagación c de un punto del frente de onda vendrá dado por la relación (Beyer, 1974)

$$c = c_0 \left(1 + \beta \frac{v_a}{c_0} \right), \quad (2.6)$$

donde c_0 es la velocidad de propagación de pequeña señal, y v_a es la velocidad de partícula. Ahora bien, esta variación de la velocidad (no linealidad) será más evidente y temprana a medida que la relación de velocidades $M = v_a/c_0 \ll 1$, también conocida como *Mach number*, aumenta, por lo que cabe pensar que una onda que se propaga con la amplitud de una onda ordinaria como la generada por el habla humana ($M = 10^{-7}$) se tendrá que propagar a una mayor distancia que una onda con la amplitud de un motor de aviación ($M = 10^{-3}$) para que se vea afectada por esta distorsión. En la práctica, los fenómenos como el *shock* no se producen en señales de pequeña amplitud debido a los efectos termo-viscosos del aire, que atenúan la señal antes de verse afectada por estas no linealidades.

2.2.2 Generalización de las ecuaciones lineales

Este apartado amplía las ecuaciones lineales del apartado anterior añadiendo considerando términos de disipación y pérdidas provocadas por la atenuación termo-viscosa del aire en base al desarrollo de Rudenko y Soluyan (1977) y Novikov y cols. (1987). Así, se llegará a la ecuación que describe la propagación no lineal de las ondas de presión en un fluido, la llamada ecuación KZK en honor a sus autores (Rem Khokhlov, Evgenia Zabolotskaya, y V. P. Kuznetsov), la cual predice la generación de sonido audible con ultrasonidos y está ampliamente extendida en los casos de generación paramétrica de ondas acústicas.

Ecuación de estado.

Se recupera la ecuación 2.2 para incluir un término de segundo grado que modele las no linealidades tal que

$$\rho_a \simeq \frac{p_a}{c_0^2} - \frac{B}{2A} \frac{p_a^2}{\rho_0 c_0^4}, \quad (2.7)$$

donde $A = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) = \rho_0 c_0^2$ es la inversa del coeficiente de compresibilidad (módulo de Bulk adiabático), y $B = \rho_0^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right) = 2\rho_0^2 c_0^3 \left(\frac{\partial c}{\partial p} \right)$ es la variación de la velocidad del sonido debido a un incremento de presión. Ambos términos constituyen el parámetro de no linealidad $\beta = 1 + \frac{B}{2A}$, que tendrá el valor $\beta = 1.2$ para el aire. Este parámetro da cuenta de la capacidad que tendrá una onda para generar armónicos en su propagación y sirve como caracterización del comportamiento no lineal de un material (Bjørnø, 2010).

Para evaluar los efectos de la conducción térmica, es común añadir un último término

$$\rho_a \simeq \frac{p_a}{c_0^2} - \frac{B}{2A} \frac{p_a^2}{\rho_0 c_0^4} + \frac{\kappa}{\rho_0 c_0^4} \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \frac{\partial p_a}{\partial t}, \quad (2.8)$$

donde κ es la conductividad térmica y C_v y C_P son el calor específico a volumen y a presión constante respectivamente.

Los términos disipativos añadidos en la ecuación de movimiento y en la ecuación de estado se agrupan en la variable b tal que

$$b = \frac{1}{\rho_0 c_0^2} (\mu_b + \frac{4}{3} \mu) + \frac{\kappa}{\rho_0 c_0^2} (\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_P}), \quad (2.9)$$

dando lugar a la difusividad acústica $\delta = c_0^2 b$.

Ecuación de continuidad (conservación de masa). Partiendo de la expresión 2.3, se puede generalizar para contemplar las no linealidades tal que (Rudenko y Soluyan, 1977)

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{v}_a = -\rho_a \nabla \cdot \vec{v}_a - \vec{v}_a \cdot \nabla \rho_a \quad (2.10)$$

Ecuación de movimiento (Euler). Incorporando términos para modelar los efectos termo-viscosos del medio, la generalización de la ecuación de Euler para las no linealidades será

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}_a}{\partial t} + \nabla^2 p_a - (\mu_B + \frac{4}{3} \mu) \Delta \vec{v}_a = -\nabla \mathcal{L}, \quad (2.11)$$

donde $\mathcal{L} = E_c - E_p = \frac{1}{2} \rho_0 \vec{v}_a^2 - \frac{p_a^2}{2 \rho_0 c_0^2}$ es la densidad lagrangiana definida como la diferencia de la energía cinética y potencial.

2.2.3 Ecuaciones de Westervelt, Burguers y KZK

Una vez generalizadas las ecuaciones fundamentales que rigen la propagación de las ondas de presión, resulta de interés analizar las propuestas más extendidas en el modelado de propagación no lineal.

Ecuación de Westervelt para una onda unidimensional plana.

Relacionando convenientemente las ecuaciones 2.7 , 2.10 y 2.11 es posible expresar la propagación de la onda acústica de manera no lineal

$$\Delta p_a - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2} \frac{\partial^3 p_a}{\partial t^3} = -\frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p_a^2}{\partial t^2}. \quad (2.12)$$

Esta ecuación se conoce como ecuación de Westervelt, desarrollada en 1963, y constituye la base del fenómeno de generación de sonido audible por ultrasonidos.

Ecuación de Burguers.

La ecuación 2.12 predice la propagación no lineal de ondas planas progresivas y regresivas tal que

$$\underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{b}{2c_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\beta p_a}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial}{\partial t}\right)}_{\text{Onda Regresiva}} \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{b}{2c_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\beta p_a}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial}{\partial t}\right)}_{\text{Onda Progresiva}} p_a = 0, \quad (2.13)$$

por lo que podemos simplificar dicha ecuación considerando únicamente la onda progresiva

$$\frac{\partial p_a}{\partial z} + \frac{1}{c_0} \frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{b}{2c_0} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} - \frac{\beta p_a}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p_a}{\partial t} = 0. \quad (2.14)$$

Esta ecuación simplificada es conocida como ecuación de Burguers (1948), y se puede compactar de una manera sencilla factorizando los términos $\frac{1}{c_0} \frac{\partial p_a}{\partial t}$ y $-\frac{\beta p_a}{\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p_a}{\partial t}$ y dotando a la velocidad de propagación c_0 de una amplitud variable

$$c = c_0 \left(1 + \frac{\beta p_a}{\rho_0 c_0^2}\right), \quad (2.15)$$

quedando la ecuación final de la forma

$$\frac{\partial p_a}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{b}{2c_0} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} = 0. \quad (2.16)$$

Existen varias propuestas de soluciones analíticas para la ecuación de Burguers. Una de ellas, en la que se basa el desarrollo propuesto por Pompei (2002), es la aproximación *quasi-lineal* a través del método de aproximaciones sucesivas. La teoría *quasi-lineal* se basa en la suposición de que los efectos no lineales son lo suficientemente débiles como para modelarlos a partir de la ecuación de onda lineal. A consecuencia de esto, efectos como la formación del shock no se pueden describir utilizando esta teoría. Esta solución se divide en $p_1(z, \tau)$ que modela la presión acústica asociada a los términos lineales, y $p_2(z, \tau)$ que contempla las no linealidades tal que

$$p_a(z, \tau) = \mu p_1(z, \tau) + \mu^2 p_2(z, \tau), \quad (2.17)$$

para $\mu \ll 1$. A la onda de presión $p_1(z, \tau)$, que contiene la componente frecuencial original (ω), se le denomina onda primaria, siendo las ondas secundarias aquellas generadas como resultado de las no linealidades del medio. Por lo tanto, la onda primaria tendrá la forma de una onda sinusoidal que se ve atenuada con la distancia

$$p_1(z, \tau) = p_0 e^{-\alpha_\omega z} \sin(\omega\tau), \quad (2.18)$$

donde el coeficiente de atenuación α_ω es

$$\alpha(\omega) = \frac{b\omega^2}{2c_0} = \frac{1}{l_a}, \quad (2.19)$$

siendo l_a la longitud de atenuación. La solución particular para la presión p_2 de las ondas secundarias es

$$p_2(z, \tau) = \frac{\omega p_0^2 \beta}{2\rho_0 c_0^3} e^{-2\alpha_\omega z} \sin(2\omega\tau). \quad (2.20)$$

Finalmente, se llega a la ecuación más extendida en la actualidad para modelar la propagación no lineal de las ondas de presión en forma de rayos sonoros: la ecuación de Khokhlov, Zabolotskaya, y Kuznetsov (ecuación KZK). Partiendo de la ecuación de Westervelt (ec. 2.12) es posible realizar un cambio en el sistema de coordenadas llegando a la expresión final de la ecuación KZK, expresada en coordenadas parabólicas

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial \tau} = \underbrace{\frac{c_0}{2} \nabla_r^2 p}_{\text{Difracción}} + \underbrace{\frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3}}_{\text{Disipación}} + \underbrace{\frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2}}_{\text{No lineal}}, \quad (2.21)$$

donde $\tau = t - z/c_0$ es el tiempo retardado, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ es la distancia radial desde el eje z (desde el centro del rayo), $p = p_a$ es la presión sonora, $\nabla_r^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + r^{-1}(\frac{\partial}{\partial r})$ es el operador Laplaciano transversal, z es la coordenada espacial en el eje del arreglo, δ es la difusividad del medio termo-viscoso y $\beta = 1 + B/2A$ el coeficiente de no linealidad que incluye al parámetro de no linealidad B/A .

Esta ecuación, propuesta en el año 1971, es conocida por describir en detalle la propagación de una onda de amplitud finita incluyendo los efectos de difracción, absorción/difusión, y las no linealidades. Esta ecuación parte de una aproximación parabólica en la que las ondas sonoras se asumen directivas y en forma de rayos colimados e introduce errores para puntos lejanos al eje del transductor (mayores que 20°) y para puntos cercanos a su superficie. Sin embargo, estas restricciones no impiden utilizar esta ecuación de una forma precisa para modelar rayos sonoros directivos. Actualmente, no existen un consenso en cuanto a soluciones analíticas exactas para esta ecuación aunque destacan

los trabajos recientes de Saha Ray (2016) y Şamil Akçağıl y Aydemir (2016) además de las múltiples aproximaciones *quasilineales*. Los algoritmos que implementan métodos numéricos como el FEM (*Finite Elements Method*) o el BEM (*Boundary Elements Method*) son los más extendidos en el campo de la ingeniería para estudiar la propagación no lineal de las ondas de presión como el propuesto por Lee (1993) conocido como *Texas code*, implementado en Fortran y posteriormente en C++.

2.3 Generación de sonido audible con ultrasonidos

Esta sección resume las características específicas de la radiación de ultrasonidos, define el concepto de array paramétrico como fuente de generación de sonido audible junto a sus modelos teóricos, y propone una colección de modulaciones en amplitud, frecuencia y fase para producir este efecto.

El uso de ultrasonidos para producir sonido en el rango de frecuencias audible (20 Hz - 20 kHz) se sustenta en los siguientes principios:

- La alta directividad de las frecuencias mayores que 20 kHz.
- La interacción no lineal entre ondas ultrasónicas.
- Altos niveles de presión sonora (>110 dB).

2.3.1 El pistón radiante y la integral de Rayleigh. Campo cercano y campo lejano.

Antes de profundizar en el fenómeno de la generación de sonido audible con ultrasonidos, resulta de interés analizar las herramientas más extendidas para el cálculo del campo de presión ultrasónico: el modelo del pistón radiante montado en pantalla infinita y la integral de Rayleigh.

El pistón radiante es un modelo de radiación acústica que consiste una superficie plana y rígida, de sección circular, que presenta una radiación sonora coherente, es decir, todos los puntos de la superficie vibrante son tratados como una fuente puntual y tienen la misma amplitud, frecuencia y fase. Estas fuentes puntuales producen una presión sonora eficaz p a la distancia r de acuerdo con (Leo L. Beranek, 2012)

$$p = j \frac{U_0 f \rho_0}{2r} e^{-jk(r-a)}, \quad (2.22)$$

donde U_0 es la velocidad de volumen eficaz de la fuente en m^3/s .

Además, el pistón suele ir montado en lo que se conoce como pantalla infinita o sonodeflector infinito para eliminar la interferencia con la radiación posterior, resultando en una radiación hemiesférica en la que la presión en un punto se puede obtener como (Leo L. Beranek, 2012)

$$p(r, t) = \frac{\sqrt{2} j f \rho_0 u_0 \pi a^2}{r} \left[\frac{2 J_1(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta} \right] e^{j \omega (t - r/c_0)} \quad (2.23)$$

donde $J_1()$ denota la función de Bessel de primer orden, u_0 es la velocidad normal eficaz del pistón, k el número de onda, ρ_0 la densidad del medio, a el radio del pistón, r la distancia al centro del pistón, ω la frecuencia angular y θ el ángulo en el que se sitúa el punto de observación con respecto a la normal. El término entre corchetes proporciona la directividad D del pistón; la presión en función del ángulo θ . Cuando la circunferencia del pistón ($2\pi a$) es menor que media longitud de la onda radiada ($ka < 0.5$) el pistón se comportará como una fuente puntual, exhibiendo un patrón de radiación omnidireccional. A medida que el producto ka aumenta, también lo hará la directividad del pistón.

Cuando el campo acústico es producido por varios pistones, se deberá calcular la presión en un punto como la contribución de cada uno de los elementos radiantes, de acuerdo con el principio de superposición enunciado anteriormente. La herramienta analítica más extendida para evaluar la presión como contribución de varias fuentes es la integral de Rayleigh (Rayleigh, 1877)

$$P(r, \omega) = \frac{j \rho_0 \omega v_0}{2\pi} \iint \frac{e^{-jk r}}{r} dS, \quad (2.24)$$

para $v_0 = cte$ en todos los puntos de la superficie del pistón.

Se entiende por ultrasonido toda onda mecánica cuya frecuencia supera los 20 kHz; aquellas que exceden el límite superior de la percepción humana. Desde comienzos del siglo XX, los ultrasonidos han sido de gran interés científico principalmente por su uso en aplicaciones de detección submarina, y mantienen a día de hoy gran relevancia en el ámbito de la acústica por la cantidad de aplicaciones en las que se emplean. El desarrollo tecnológico en el campo de los ultrasonidos liderado por Langevin, ha posibilitado la aparición de nuevos tipos de transductores diseñados específicamente para la radiación de altas frecuencias como los que utilizan materiales piezoeléctricos. El campo acústico generado por estos transductores cuenta con unas características peculiares, pudiendo diferenciar dos regiones en base a la distribución y variación de la presión a lo largo de la dirección de la vibración del pistón: el campo cercano y el campo lejano.

Campo cercano.

Considerando el modelo del pistón radiante de radio $a > \lambda/2$, para el caso de campo

cercano, el punto de observación se encuentra en una zona próxima a la superficie vibrante, por lo que también es llamada región de Fresnel por su analogía con la óptica. Esta región está dominada por la interferencia, dando lugar a una fluctuación de la presión en el eje con máximos y mínimos locales consecutivos a medida que el punto de observación se separa de la fuente. Además, en la región de campo cercano, el haz producido mantiene un diámetro constante que depende del diámetro del pistón ($2a$) y de la longitud de onda radiada λ . A lo largo del eje, la amplitud de la presión variará de acuerdo con la siguiente expresión (Lawrence E. Kinsler, 2000)

$$P(r, t) = 2\rho_0 c U_0 \left| \sin\left(\frac{kr}{2}(\sqrt{1 + (a/r)^2} - 1)\right) \right|, \quad (2.25)$$

donde r es la distancia axial y U_0 la velocidad normal del pistón (ver figura 2.2). La distancia a la cual tiene lugar el último máximo se conoce como distancia de Rayleigh d_R (también llamada distancia de Fresnel) y viene dada por (Lawrence E. Kinsler, 2000)

$$d_R = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}. \quad (2.26)$$

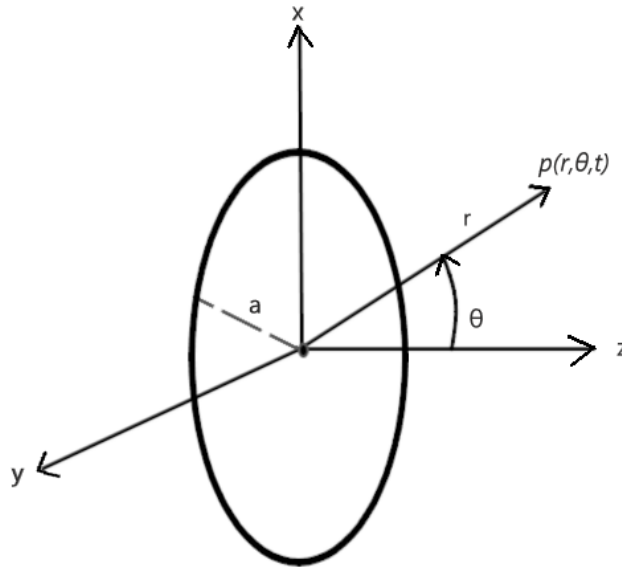


Figura 2.1: Geometría utilizada para calcular la presión en el punto (r, θ) para un pistón circular plano (basado en Cheeke (2002)).

Esta magnitud tendrá sentido físico siempre que a/λ sea lo suficientemente grande para que $d_R > 0$, lo que predice que si, por ejemplo, el radio $a = \lambda/2$ no existirá región de campo cercano quedando el campo acústico exento de las interferencias mencionadas

anteriormente. A partir de la distancia de Rayleigh, la presión decaerá con la distancia de acuerdo con la dependencia $1/r$, siendo r la distancia axial al centro del pistón.

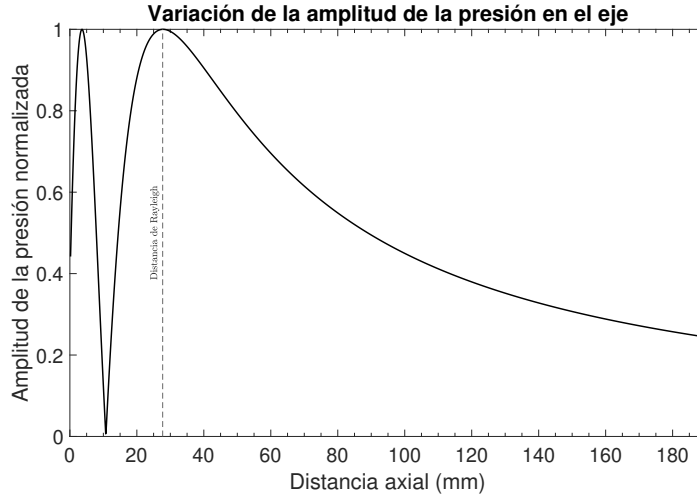


Figura 2.2: Variación de la presión con la distancia en el eje para una pistón de radio $a = 16\text{mm}$ radiando a una frecuencia $f = 40\text{kHz}$.

Campo lejano.

En el campo lejano, el frente de ondas se asume plano. La radiación en esta región para un punto de coordenadas (r, θ) , según la geometría de la figura 2.1, se obtiene imponiendo la condición $r \gg a$, siendo la presión $P(r, \theta, t)$ en el eje (Lawrence E. Kinsler, 2000)

$$P(r, \theta, t) = \frac{j\rho_0 U_0 c k a^2}{2r} e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (2.27)$$

El término entre corchetes da cuenta de la variación de presión respecto a la dirección, por lo que el máximo valor de la presión será el módulo de la función de directividad D tal que

$$D(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (2.28)$$

Al trabajar con transductores de ultrasonidos que cuentan con patrones de radiación muy directivos, es conveniente caracterizar la directividad del haz sonoro como el ángulo θ_{HP} en el que la presión acústica sea igual a la mitad de la presión en el eje (-6 dB).

Concretamente para un rayo demodulado, se puede utilizar la expresión (Beyer, 1974)

$$\theta_{HP} = 1.88\sqrt{\frac{\lambda}{L}}, \quad (2.29)$$

donde L es la longitud efectiva del array y λ la longitud de onda de la frecuencia portadora.

2.3.2 El altavoz paramétrico

A continuación, se incluye una descripción completa del altavoz paramétrico además de las propuestas teóricas más relevantes a la hora de predecir y explicar la radiación acústica de los arrays de ultrasonidos, objeto de investigación de este trabajo.

El fenómeno del altavoz paramétrico, en adelante PAA (del inglés, *Parametric Acoustic Array*) o PAL (del inglés, *Parametric Acoustic Loudspeaker*), fue observado por primera vez por Peter J. Westervelt en la década de 1950 y consiste en un mecanismo de transducción no lineal capaz de generar rayos sonoros colimados carentes de lóbulos laterales a partir de la interacción de dos ondas ultrasónicas (ondas primarias). Dicha interacción produce, entre otros efectos que se discutirán más adelante, una onda secundaria de frecuencia igual a la diferencia de frecuencias de las ondas primarias y de directividad similar a estas.

El PAL se beneficia de la gran directividad que exhiben las altas frecuencias por tener longitudes de onda mucho menores que los elementos que las producen, pudiendo así dirigir el sonido hacia puntos concretos del espacio o a lo largo de rayos acotados. Esta tecnología fue concebida como una técnica para mejorar la directividad y el ancho de banda disponible de los dispositivos SONAR (*SOund Navigation And Ranging*) utilizados para la localización de objetos bajo el agua. A la publicación en 1963 del paper "*Parametric Acoustic Array*" por parte de Westervelt, le sucedieron varias investigaciones e intentos de fabricar este tipo de altavoces. Destaca el análisis de Bennett y Blackstock (1975), quienes profundizaron en el comportamiento del PAL en el aire mediante la emisión de dos tonos a 18.6 y 23.6 kHz respectivamente, generando un tono audible de 5 kHz. Estas investigaciones evidenciaron los problemas principales de esta tecnología: (i) la distorsión audible producida como subproducto de intermodulación, (ii) altos requerimientos de potencia para producir grandes niveles de presión sonora (>110 dB SPL) necesarios para evidenciar los efectos no lineales del aire, (iii) posibles efectos adversos en la salud por la larga exposición a ultrasonidos de alto nivel de presión y (iv) problemas generales de viabilidad como el procesado de señal o la elección de los transductores. Destaca el trabajo de Yoneyama y cols. (1983) en el que logra concebir un nuevo concepto de altavoz utilizando 547 transductores piezoeléctricos y una modulación AM. Sin embargo, no fue hasta el año 2002 cuando Joseph Pompei, estudiante en el MIT Media

Lab de Massachusetts por aquel entonces, consiguió su doctorado por el trabajo *Sound from Ultrasound*. En su tesis, J. Pompei se consolida como pionero en la creación de un altavoz paramétrico con una gran directividad en comparación con los altavoces electrodinámicos convencionales (ver figura 2.3), y con niveles de distorsión muy bajos apto para reproducir audio con calidad, demostrándolo con un amplio set de medidas experimentales.

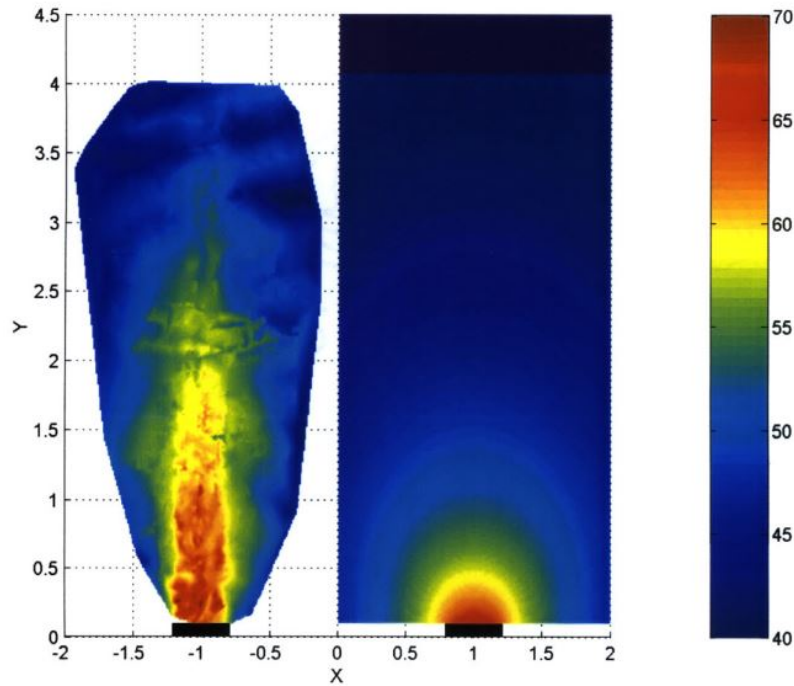


Figura 2.3: Comparación de la radiación a 400 Hz un array paramétrico (izquierda) con un altavoz electrodinámico de tamaño similar (derecha) (Pompei, 2002)

Para el caso de los altavoces paramétricos, la interacción no lineal tendrá lugar principalmente en la región de campo cercano. De manera más precisa, la región de interacción no lineal entre ondas ultrasónicas tendrá un límite espacial llamado distancia de absorción $l_\alpha = 1/\alpha$ a partir de la cual, la onda portadora se habrá atenuado por completo, quedando solo el sonido audible generado por dicha interacción ya que las frecuencias audibles tendrán una distancia de absorción mucho mayor a la de la portadora ($\alpha \propto \omega^2$). Por esta razón, es común encontrar en la literatura del altavoz paramétrico el término *exponentially tapered end-fire array* para hacer referencia a la región en la que sucede la interacción anteriormente citada. El sonido audible se generará a lo largo de todo el recorrido de las ondas primarias, desde su creación hasta su absorción. Ya que el sonido audible no se genera en un punto localizado como en las fuentes convencionales (en la discontinuidad entre el diafragma y el

medio), sino que tiene lugar a lo largo de toda una región, se trata esta misma región como un array longitudinal en la dirección axial y se "estrecha infinitamente" ya que la atenuación de la portadora con la distancia disminuye considerablemente el nivel de presión audible.

Son varias las propuestas analíticas para tratar de predecir el campo acústico producido por el PAL en función de parámetros como la amplitud de la portadora, el índice de modulación o el radio del transductor. Una de las más aceptadas, por su simplicidad y claridad, es la propuesta por Berktaý (1965) para una modulación AM y en condiciones de campo lejano ($r \gg a$)

$$p_2 = \frac{\beta P_0^2 a^2}{16 \rho_0 \alpha c_0^4 r} \frac{d^2}{d\tau^2} E^2(\tau), \quad (2.30)$$

donde β es el coeficiente no lineal, p_2 es la presión audible resultante de la interacción no lineal en el aire, P_0 es la amplitud de la presión de la onda portadora, a es el radio del transductor emisor, ρ_0 es la densidad del aire, c_0 la velocidad de propagación del sonido en aire y $E(\tau)$ es la envolvente temporal de la onda modulada en amplitud. De esta ecuación se puede deducir de manera directa lo siguiente (Pompei, 2002):

- El nivel de presión audible p_2 es directamente proporcional al cuadrado del nivel de presión de la onda portadora ($p_2 \propto P_0^2$) por lo que cada vez que se duplique el nivel de la portadora se cuadruplicará el nivel de presión audible.
- El nivel de presión audible es proporcional al cuadrado del radio del transductor.
- La baja frecuencia requiere mayor nivel en la portadora para resultar audible debido a la segunda derivada temporal de la envolvente ($\frac{d^2}{d\tau^2} E^2(\tau)$) que se traduce en una curva de ecualización de +12 dB/oct.
- El resultado audible se corresponde con el cuadrado de la envolvente ($E^2(\tau)$), prediciendo así una señal audible distorsionada.

Así, se puede entender la ecuación 2.30 como la función de transferencia del canal no lineal, por lo que la señal de entrada requerirá de tratamiento previo para compensar las modificaciones introducidas por el canal. A este tratamiento de la señal moduladora, previo al esquema de modulación, se le conoce como precompensación. La finalidad de la precompensación es la de reducir el nivel de distorsión audible generada por los efectos no lineales, dando lugar a nuevos esquemas de modulación que ya incorporan el tratamiento previo de la señal moduladora como se revisará en la siguiente sección.

La directividad del array es una medida del nivel de presión en el eje comparado con los niveles de presión para los demás ángulos. La expresión más extendida para el cálculo del factor de directividad $Q(f)$ es (Leo L. Beranek, 2012)

$$Q(f) = \frac{4\pi p_{\text{rms}}^2(0)(180/\pi)}{2\pi \sum_{n=1}^{180/\Delta\theta} p_{\text{rms}}^2(\theta_n) \sin(\theta_n) \Delta\theta}, \quad (2.31)$$

donde $\Delta\theta$ es la resolución angular de la medida de la presión p_{rms} para el ángulo θ . Para comparar la directividad de las fuentes, es común encontrar el parámetro $DI(f)$ conocido como índice de directividad

$$DI(f) = 10 \log_{10} Q(f). \quad (2.32)$$

2.3.3 Modulaciones

En esta sección, se estudiarán varias modulaciones en amplitud, frecuencia y fase, como método principal (no es el único) de producción de sonido audible con ultrasonidos. La modulación en amplitud pertenece a la familia de modulaciones lineales mientras que las modulaciones en frecuencia y en fase, pertenecen a la familia de las modulaciones exponenciales (no lineales), siendo estas últimas muy parecidas a nivel de formulación.

Si una onda $s(t)$ cuyo contenido espectral se encuentra en el rango audible (moduladora), modula la amplitud, frecuencia o fase de una onda de ultrasonidos $c(t)$ (portadora), la onda modulada resultante $y(t)$ se demodulará en el aire mediante un proceso no lineal, produciendo una onda secundaria con el mismo contenido espectral que la señal moduladora. Matemáticamente, el proceso heterodino conlleva la multiplicación de las funciones trigonométricas sin o cos. Para ilustrar este efecto, se muestra la multiplicación de los factores $\cos \alpha$ y $\cos \beta$ cuyo resultado es

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}(\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)). \quad (2.33)$$

De esta expresión se deduce que la interacción de dos ondas de distinta frecuencia producirá un espectro que incluye la suma y diferencia de frecuencias. La frecuencia producida por la suma de las frecuencias primarias, se atenuará rápidamente con la distancia ($\alpha \propto \omega^2$). Algunas de las modulaciones descritas en esta sección utilizan el concepto de precompensación con el objetivo de contrarrestar los efectos no lineales del aire predichos por Berkay en la ecuación 2.30 reduciendo así la distorsión audible y compensar la respuesta en frecuencia del transductor, sobre todo en baja frecuencia. La distorsión armónica puede ser valorar a través del parámetro THD (del inglés, *Total Harmonic Distortion*)

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}, \quad (2.34)$$

donde V_n representa la amplitud lineal del armónico n .

2.3.3.1 Modulaciones en amplitud (AM)

La modulación de amplitud modifica la amplitud de una señal portadora en función de la envolvente de una señal moduladora. Según el espectro resultante de la modulación, se pueden distinguir varios tipos de modulaciones de amplitud quedando las más relevantes descritas a continuación. Junto a cada modulación, se proporcionará la presión audible resultante según el trabajo de Tan y cols. (2008).

DSB-AM (*Double-Sideband Amplitude Modulation*)

La modulación de doble banda lateral es una modulación lineal que produce en su espectro dos bandas laterales a cada lado de la frecuencia de la portadora conteniendo ambas la información de la señal moduladora. Suponiendo una señal moduladora $s(t) = A_s \cos(\omega_s t)$, de frecuencia angular ω_s , en rad/s y amplitud A_s , y una señal portadora $c(t) = A_c \cos(\omega_c t)$, de frecuencia angular ω_c y amplitud A_c , ambas con fase inicial nula, la señal modulada $y_{\text{DSB-AM}}(t)$ tendrá la siguiente forma, de acuerdo con el diagrama de la figura 2.4,

$$y_{\text{DSB-AM}}(t) = [1 + m A_s \cos(\omega_s t)] A_c \cos(\omega_c t) = [1 + m s(t)] c(t) \quad (2.35)$$

donde m es el denominado índice de modulación de valores $0 \leq m \leq 1$.

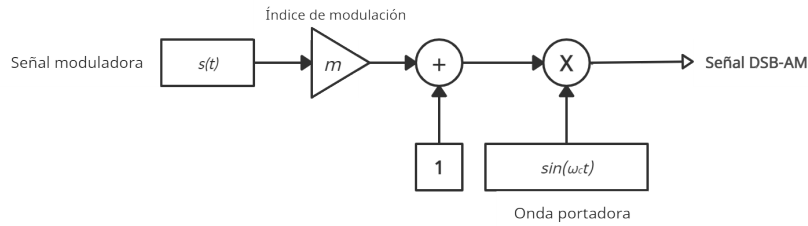


Figura 2.4: Diagrama de bloques de la modulación DSB-AM. *Fuente propia*

En la expresión anterior, podemos distinguir la envolvente $E(t) = [1 + m s(t)] A_c$.

En el dominio de la frecuencia, el espectro de la señal modulada $Y_{\text{DSB-AM}}(f) = [1 + m S(f)] * C(f)$ tendrá la forma:

$$Y_{\text{DSB-AM}}(f) = \frac{A_c}{2} \delta(f - f_c) + \frac{A_c}{2} m S(f - f_c) + \frac{A_c}{2} \delta(f + f_c) + \frac{A_c}{2} m C(f + f_c) \quad (2.36)$$

donde $*$ denota la operación de convolución, δ es la función delta de Dirac, y $S(f)$ y $C(f)$ denotan la transformada de Fourier de la señal moduladora y la señal portadora respectivamente.

Existe una variante de esta modulación denominada *DSB-SC (Double Side Band - Supressed Carrier)* en la que se suprime la portadora concentrando así la energía únicamente en las bandas laterales. Sin embargo esta modulación no será utilizada al carecer en su espectro de la onda portadora. La presión audible derivada de la expresión de Berkay (ec. 2.30), para el caso en el que la señal moduladora es un tono puro de frecuencia ω_m , es

$$p_{\text{DSB}} = -\frac{\beta P_0^2 a^2 m \omega_m^2}{8 \rho_0 c_0^4 \alpha r} \sin \omega_m t. \quad (2.37)$$

SSB-AM (*Single-Sideband Amplitude Modulation.*)

Esta modulación, basada en la anterior, elimina una de las bandas laterales para concentrar toda la energía en una única banda (superior o inferior). Esto se puede conseguir mediante un filtro paso alto o paso bajo (banda superior o banda inferior respectivamente) o añadiendo la componente en cuadratura $\hat{s}(t)$ a la modulación con un filtro de Hilbert. Así, la modulación SSB-AM tendrá la forma:

$$y_{\text{SSB-AM}}(t) = [1 + ms(t)] \cos(\omega_c t) \pm m\hat{s}(t) \sin(\omega_c t) \quad (2.38)$$

donde el símbolo \pm será $(-)$ para la banda inferior o $(+)$ para la banda superior.

SR-AM (*Square Root Amplitude Modulation.*)

Esta modulación pretende eliminar la distorsión audible introduciendo infinitos armónicos en la señal $s(t)$, aumentando considerablemente su ancho de banda, según la ecuación

$$y_{\text{SR-AM}}(t) = \sqrt{1 + ms(t)} \sin(\omega_c t). \quad (2.39)$$

En la práctica, esta modulación está limitada por la respuesta en frecuencia del transductor utilizado ya que este deberá de ser capaz de reproducir todos los armónicos generados.

MAM (*Modified Amplitude Modulation.*)

Las modulaciones propuestas a continuación, hacen uso del concepto de precompensa-

ción para lidiar con los efectos producidos por el medio no lineal como la distorsión audible o la respuesta en frecuencia.

- MAM1

$$y_{\text{MAM1}}(t) = [1 + ms(t)]\sin(\omega_c t) + [1 - \frac{1}{2}m^2 s^2(t)]\cos(\omega_c t). \quad (2.40)$$

La presión de la señal demodulada p_{MAM1} para una señal moduladora $s(t)$ será:

$$p_{\text{MAM1}} = \frac{\beta P_0^2 a^2 m}{8\rho_0 c_0^4 \alpha r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} s(t). \quad (2.41)$$

Para el caso de una señal moduladora de una sola frecuencia ω_m , la ecuación 2.40 quedaría como

$$p_{\text{MAM1}} = -\frac{\beta P_0^2 a^2 m \omega_m^2}{8\rho_0 c_0^4 \alpha r} \sin \omega_m t. \quad (2.42)$$

- MAM2

$$y_{\text{MAM2}}(t) = [1 + ms(t)]\sin(\omega_c t) + [1 - \frac{1}{2}m^2 s^2(t) - \frac{1}{8}m^4 s^4(t)]\cos(\omega_c t) \quad (2.43)$$

Precompensación psicoacústica

El método propuesto por Geng y Yuting (2019) para aumentar la respuesta en baja frecuencia utiliza la técnica conocida como fundamental ausente o bajo virtual. Esta técnica consigue una percepción de un tono fundamental a partir de la emisión de sus armónicos, siendo posible crear una percepción de baja frecuencia a partir de componentes de frecuencia superior. Las propuestas de precompensación son

$$F_{\text{ATSR}}(s) = -0.9679x^6 + 0.6669x^5 + 0.7828x^4 - 0.1838x^3 - 0.0859x^2 + 0.3826x + 0.3613 \quad (2.44)$$

$$F_{\text{EXP2}}(s) = -0.8632x^6 + 0.6476x^5 + 0.6871x^4 - 0.2309x^3 - 0.0470x^2 + 0.4596x + 0.3050 \quad (2.45)$$

2.3.3.2 Modulación en frecuencia (FM)

En la modulación en frecuencia, la frecuencia de la portadora cambia de acuerdo con la señal moduladora, manteniendo la amplitud constante. El índice de modulación β en este caso, viene dado por la desviación de frecuencia máxima Δf permitida en la modulación y la frecuencia moduladora f_m tal que $\beta = \frac{\Delta f}{f_m}$. Así, la señal temporal modulada en frecuencia tendrá la forma (Faruque, 2017):

$$y_{\text{FM}}(t) = A_c \cos(\omega_c t + \Delta f) \int_{-\infty}^t s(\tau) d\tau = A_c \cos(2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)) \quad (2.46)$$

El espectro de esta señal será:

$$Y_{\text{FM}}(f) = \frac{A_c}{2} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(\beta) (\delta(f - f_c - n f_m) + \delta(f + f_c + n f_m)) \quad (2.47)$$

donde n representa el número del armónico.

2.3.3.3 Modulación en fase (PM)

En la modulación en fase, la fase de la portadora cambia de acuerdo con la fase de la onda moduladora, manteniendo la amplitud constante igual que en el caso anterior (Lathi y Ding, 2009).

$$y_{\text{PM}}(t) = A_c \cos(\omega_c t + \delta \theta s(t)) \quad (2.48)$$

donde $\delta \theta$ es una constante llamada desviación de fase (rad).

3 Desarrollo

El desarrollo de este trabajo comprende los siguientes apartados:

- Implementación analítica en MATLAB de la integral de Rayleigh para predecir la radiación acústica de arrays de ultrasonidos.
- Elaboración de un código de tratamiento digital de la señal en MATLAB para llevar a cabo las modulaciones y el pre/post-procesado necesario para la experimentación con el array.
- Implementación en COMSOL Multiphysics de un modelo numérico para simular la radiación acústica de los array de ultrasonidos mediante el método de elementos de contorno (*BEM, Boundary Elements Method*) con un estudio en el dominio de la frecuencia.
- Construir un altavoz paramétrico en base a unos criterios de diseño que permita evaluar el efecto de la generación de sonido audible y sus ventajas, junto con una caracterización completa del array construido en base a su directividad, respuesta en frecuencia y distorsión armónica entre otros.

3.1 Modelo analítico - MATLAB

El altavoz paramétrico es capaz de generar sonido audible manteniendo la directividad de la onda ultrasónica (la onda portadora). Por lo tanto, resulta de interés conocer el campo acústico producido por el array a la frecuencia de la portadora (40 kHz) para valorar la directividad de la que se beneficiará el altavoz paramétrico así como la posición de los máximos y mínimos que tienen lugar en el campo cercano. Para ello, se utilizarán herramientas analíticas ampliamente extendidas en el modelado de pistones como la integral de Rayleigh (ec. 2.24) bajo implementación en el software MATLAB R2021a.

Radiación ultrasónica del array.

En primer lugar, se llevará a cabo la simulación de la radiación en un plano de 50x50 cm de un solo pistón de 16 mm de diámetro a la frecuencia de 40 kHz, ya que dichos

parámetros coinciden con los transductores disponibles para la construcción del altavoz paramétrico de los apartados siguientes. Una vez realizado el modelo de un solo pistón, se ampliará para modelar un array de 9x5 transductores y evaluar nuevamente el campo acústico producido a 40 kHz en un plano de 50x50 cm. Por último, se llevará a cabo otra simulación con un array circular de 7 elementos para observar el fenómeno de la focalización, obteniendo nuevamente un plano de 50x50 cm a la frecuencia de 40 kHz. Las características de la implementación analítica se reflejan en la tabla 3.1.

PARÁMETROS DEL MODELO ANALÍTICO	
Frecuencia de análisis	40 kHz
Diámetro de los transductores/pistones	16 mm
Número de elementos	9 x 5 = 45
Distancia en x	50 cm
Resolución en x	1 mm
Distancia en y	0 cm
Resolución en y	1 mm
Distancia en z	50 cm
Resolución en z	1 mm
Densidad del medio	1.21 kg/m ³
Velocidad normal del pistón	1 m/s
Velocidad de propagación	343 m/s

Tabla 3.1: Parámetros del modelo analítico de MATLAB para la implementación de la integral de Rayleigh.

Solución a la ecuación de Burguers.

A fin de evaluar la distorsión no lineal que sufre una onda de alta presión en su propagación, se implementará de manera analítica en MATLAB la solución a la ecuación de Burguers por el método de las aproximaciones sucesivas de las ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.20. Con esta implementación se determinará el perfil de la onda en varios instantes de tiempo junto a su espectro, observándose así la aparición de armónicos fruto de la distorsión. Los parámetros de la simulación se reflejan en la tabla 3.2.

3.2 Modelo numérico - COMSOL Multiphysics

De manera complementaria al modelo analítico, se implementará el array de 9x5 transductores en el software de simulación COMSOL Multiphysics. Se llevará a cabo la simulación a través del método de elementos de contorno (BEM, *Boundary Elements Method*) en el módulo de "Acústica" para evaluar el campo de presión a la frecuencia de la portadora. Este método no necesita mallar el espacio de trabajo por completo como el método de elementos finitos (FEM) sino que solo necesita resolver las ecuaciones diferenciales para los contornos

de la geometría empleada, resultando en un método más eficiente que el FEM en este caso.

Para comenzar el modelo, se deben elegir las dimensiones espaciales, la interfaz física a utilizar y el tipo de estudio a realizar. Para este caso, se elegirá (ver figura 3.1):

- Dimensión espacial: 3D.
- Interfaz física: Acústica > Presión Acústica: Elementos de contorno (pabe).
- Tipo de estudio: Dominio de la frecuencia.

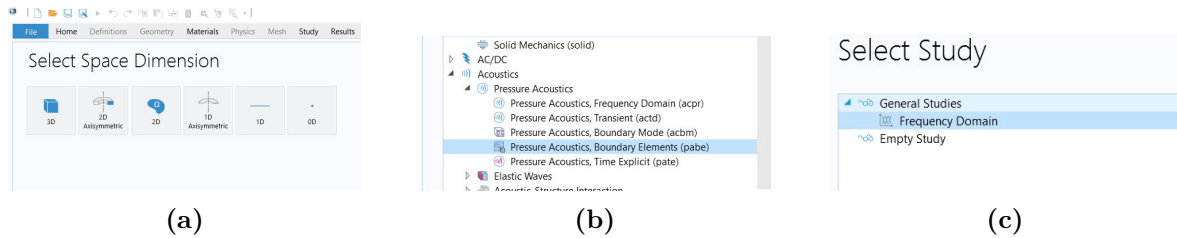


Figura 3.1: Selección de las condiciones de la simulación en COMSOL Multiphysics: (a) selección de las dimensiones espaciales (3D), (b) selección de la interfaz física, y (c) selección del estudio a realizar.

El flujo en un proceso de simulación de COMSOL Multiphysics se muestra en la imagen 3.2, por lo que se explicará el proceso seguido hasta la implementación completa del modelo.

PARÁMETROS DEL MODELO ANALÍTICO - ECUACIÓN DE BURGERS	
Frecuencia de análisis (f)	40 kHz
Velocidad del sonido (c_0)	343 m/s
Amplitud (p_0)	1e6 Pa
Densidad (ρ_0)	1.21 kg/m ³
Longitud de propagación	$z = 0 - 1$ m
Intervalo temporal	1/(1000f)
Viscosidad dinámica (μ_B)	1.81e-5 Pa·s
Viscosidad cinética (μ)	1.48e-5 m ² /s
Calor específico, presión cte. (c_p)	1007 J/kg·K
Calor específico, temperatura cte. (c_v)	717 J/kg·K
Conductividad térmica @15°C (κ)	25.2e-3 W/m·K
Coefficiente no lineal (β)	1.25

Tabla 3.2: Parámetros del modelo analítico dela solución a la ecuación de Burguers.

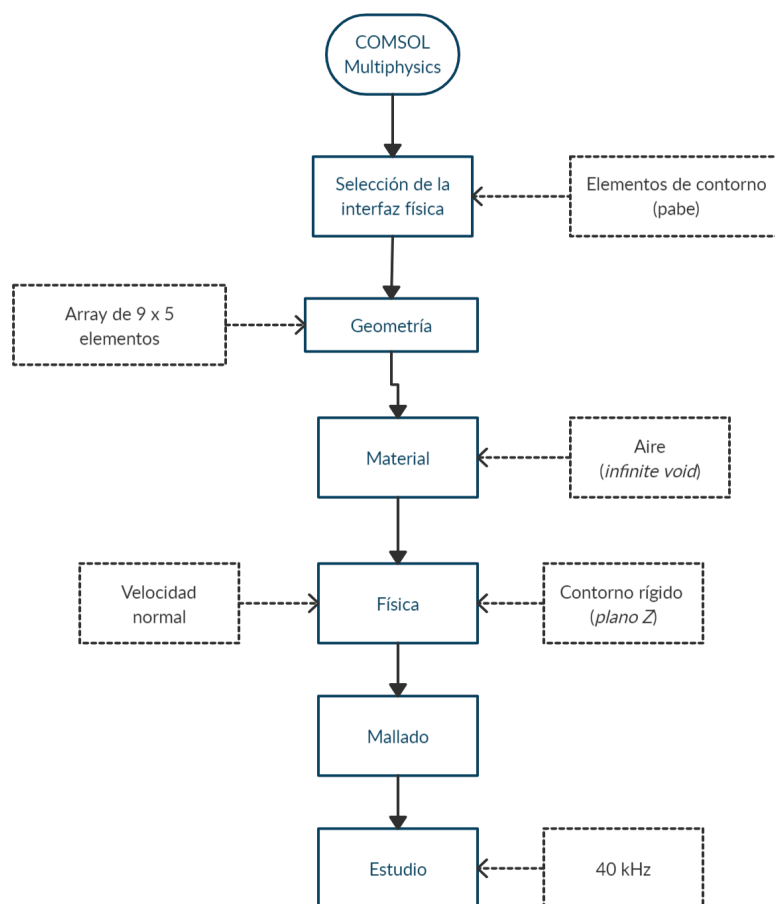
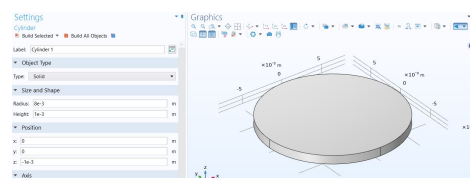


Figura 3.2: Diagrama de flujo del proceso de simulación numérica en COMSOL Multiphysics.

Una vez establecidas las condiciones de la simulación, se procede a realizar la geometría definiendo los parámetros de la figura 3.3a. Para simular el pistón radiante, se crea un cilindro de 8 mm de radio y un espesor de 1 mm como el de la figura 3.3b.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
D	16e-3	0.016	Diámetro del pistón
N	5	5	Número de elementos en...
M	9	9	Número de elemento en X
f0	40e3 [Hz]	40000 Hz	Frecuencia de análisis

(a)



(b)

Figura 3.3: Modelado numérico en COMSOL: (a) selección de los parámetros del estudio, y (b) creación de la geometría del cilindro para simular el pistón radiante.

Utilizando la herramienta "Array", se selecciona el cilindro anterior para crear un array de

$N \times M$ elementos sin separación entre ellos tal y como se muestra en la figura 3.4a. Se situará el centro del elemento central (3,5) en el origen de coordenadas.

Una vez establecida la geometría, se seguirá el flujo de procesos en COMSOL eligiendo el material para la simulación. Se selecciona el material "aire" para el espacio infinito en el que se calculará la presión resultante de la vibración de los pistones (*Infinite void*) como se muestra en la figura 3.4b.

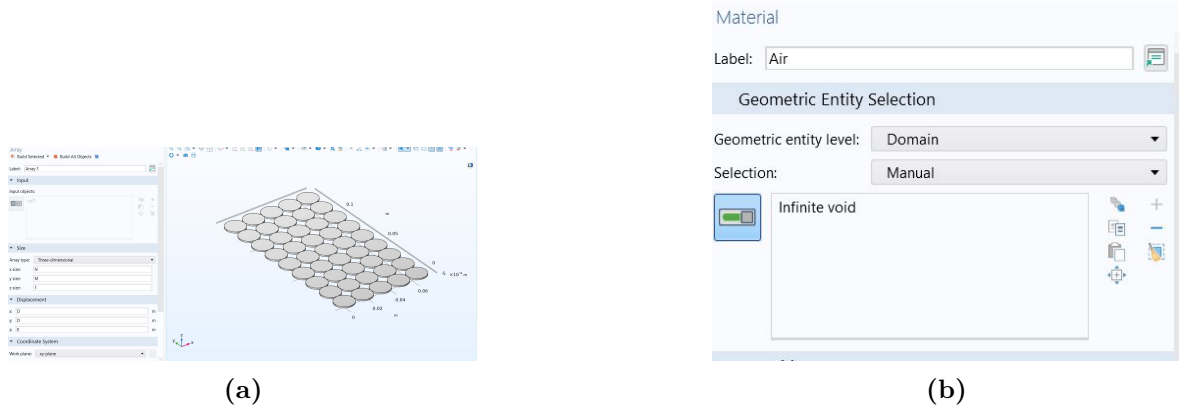


Figura 3.4: Proceso de simulación en COMSOL Multiphysics: (a) creación del array de 9 x 5 elementos, y (b) aplicación del material "aire" al espacio infinito.

De la misma manera, se selecciona la interfaz física y se aplica al infinito, estableciendo un plano de simetría (de contorno rígido) sobre la base del array, en $z = 0$ según la figura 3.5a. Además, se añade la condición de contorno "velocidad normal" a la cara superior de cada cilindro de acuerdo con la figura 3.5b con un valor de referencia de 1 m/s puesto que se desconoce la velocidad normal de los transductores reales.

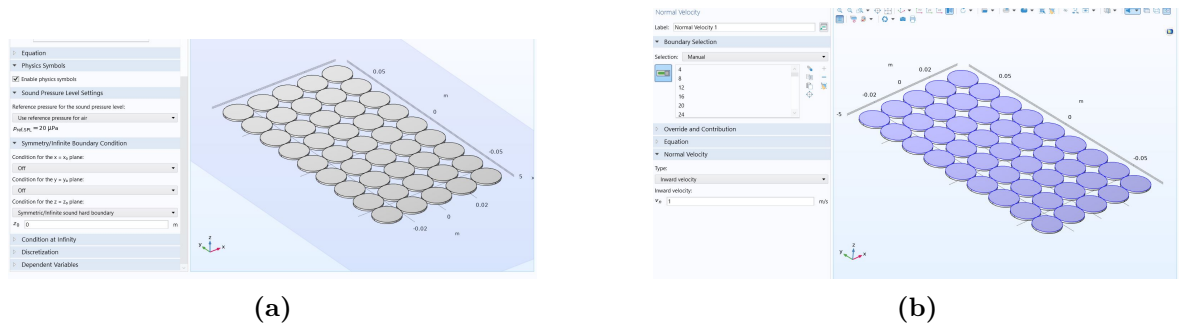


Figura 3.5: Proceso de simulación en COMSOL Multiphysics: (a) aplicación de la condición de contorno de pared rígida, y (b) aplicación de la condición de contorno de velocidad normal.

Por último, se realiza un mallado con un tamaño de elementos "Normal" y se ejecuta el cálculo del estudio a la frecuencia de 40 kHz de acuerdo con las figuras 3.6a y 3.6b respecti-

vamente.

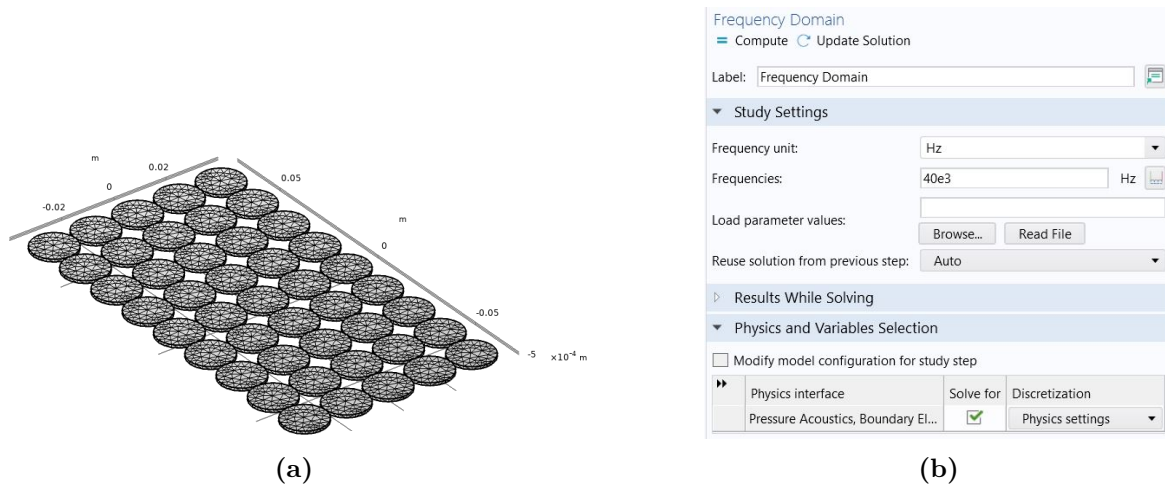


Figura 3.6: Proceso de simulación en COMSOL Multiphysics: (a) mallado de la geometría (tamaño normal), y (b) parámetros del estudio a realizar en el dominio de la frecuencia.

3.3 Construcción de un altavoz paramétrico

Esta sección describe el procedimiento experimental para la implementación práctica de un array de ultrasonidos capaz de generar sonido audible altamente directivo bajo los siguientes criterios de diseño:

- El array será capaz de generar sonido audible fácilmente perceptible a varios metros del array.
- El patrón de radiación del arreglo paramétrico ofrecerá un lóbulo principal más estrecho para la mayoría de frecuencias en el rango audible, y minimizará la amplitud de los lóbulos laterales comparado con altavoces convencionales de área de radiación equivalente.
- Los índices de distorsión armónica del sonido audible generado serán lo suficientemente bajos como para garantizar la correcta inteligibilidad de un mensaje de voz.
- El coste total del proyecto será el mínimo indispensable para lograr el efecto de la generación de sonido audible con ultrasonidos sin requerir de equipo especializado.
- El procesamiento de señal necesario, como modulaciones, filtros, preprocesado o ecualizaciones, se llevará a cabo de manera digital y serán los conversores D/A y A/D integrados

en el sistema DAQ (*data acquisition*) o tarjeta de sonido los responsables de transformar las señales discretas generadas por software en señales continuas y viceversa, prescindiendo de circuitería analógica para estos fines.

La implementación experimental del array paramétrico se ha dividido en dos fases (ver figura 3.7): (i) una primera aproximación de implementación doméstica y de mínimo coste económico, a fin de valorar la viabilidad en la construcción de este tipo de dispositivos, y (ii) una segunda aproximación en entorno de laboratorio, creando dos tipos distintos de arrays: un array circular de 8 elementos, y un array rectangular de 9x5 transductores. En esta segunda aproximación, se dispone de hardware con suficiente capacidad de muestreo y de herramientas como software especializado o instrumentos de medición automatizados, no disponibles en ambientes domésticos, que permitirán llevar a cabo una caracterización técnica del array construido.

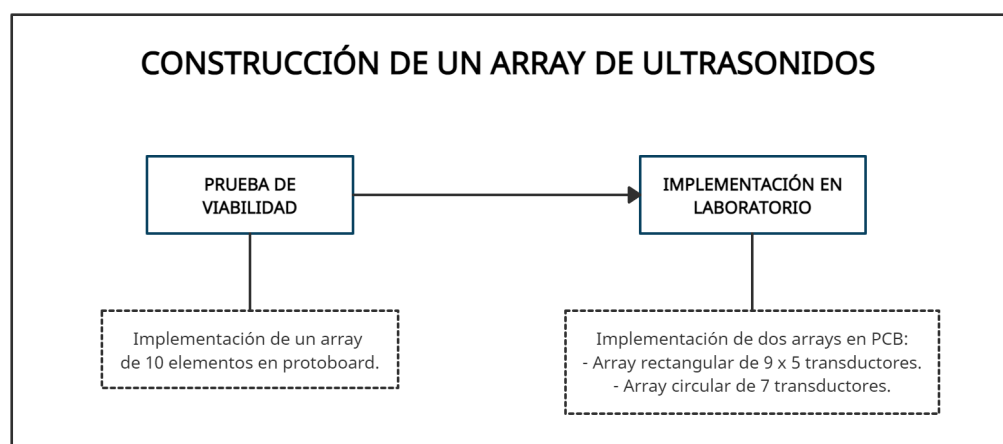


Figura 3.7: Proceso seguido en la construcción del array de ultrasonidos

La primera aproximación ofrece por lo tanto la construcción de un dispositivo que contenga los elementos mínimos necesarios para la recreación del efecto de la generación audible por ultrasonidos, dejando a un lado la preocupación por los índices de distorsión armónica o el nivel de presión audible, pero obteniendo una directividad considerable en comparación con la radiación de los transductores electrodinámicos convencionales. Por el contrario, la segunda aproximación, pretende crear un array paramétrico apto para su posible aplicación práctica y que cumpla con los criterios de diseño enunciados anteriormente, siguiendo un proceso experimental iterativo que evalúe constantemente los parámetros de diseño de este tipo de arrays y su efecto en la radiación acústica.

3.3.1 Requisitos mínimos necesarios

La generación de sonido audible con arrays de ultrasonidos posee unas condiciones de implementación específicas para llevarse a cabo, siendo todas ellas necesarias. Estas condiciones son:

- El nivel de presión radiada, de la onda portadora, deberá de ser mayor o igual a 90dB SPL (re. 20 μPa) a un metro del transductor o del arreglo que la genere para que el sonido audible resulte fácilmente perceptible; la sensibilidad de los transductores utilizados deberá de ser mayor o igual a 90dB.
- El hardware utilizado deberá ser capaz de generar señales analógicas en el régimen ultrasónico, es decir, contará con una frecuencia de muestreo que al menos cumpla el criterio de Nyquist en relación a la frecuencia máxima generada para cada caso.
- La señal entregada al array deberá estar amplificada con un amplificador que introduzca la menor distorsión armónica posible y que cumpla con los requisitos de potencia del arreglo al que se conecte a fin de garantizar un nivel de presión suficiente tras la conversión electro-mecánico-acústica.
- La respuesta en frecuencia de los transductores utilizados deberá permitir la radiación en frecuencias próximas a la de resonancia (al menos ± 0.5 kHz).

Además, la señal necesaria para lograr el efecto de la generación de sonido audible con ultrasonidos debe contener al menos 2 ondas, denominadas primarias, de frecuencias distintas y superiores a 20 kHz cuya interacción produzca una nueva onda secundaria de frecuencia igual a la diferencia de la frecuencia de las primarias. Esto se puede lograr de varias maneras:

- Utilizando al menos dos transductores que radien a frecuencias distintas y asegurando la interacción espacial de las ondas que generen.
- Utilizando al menos un transductor alimentado por una señal modulada en amplitud, en frecuencia o en fase cuyo espectro contenga las componentes que interactuarán de manera no lineal en el medio.

En este trabajo, se utilizarán modulaciones en amplitud, en frecuencia y en fase implementadas en MATLAB para generar el sonido audible. Trabajar la señal a nivel digital posibilita una experimentación más directa y rápida con el altavoz paramétrico, ya que permite probar todos los tipos de modulaciones descritas en el apartado 2.3.3 y realizar un estudio paramétrico de valores como el índice de modulación en un entorno controlado. La implementación analógica del array paramétrico es totalmente posible y viable mediante el uso de circuitos

integrados como el 555 o el TL494 que producen una modulación del ancho del pulso (*Pulse Width Modulation*) con resultados parecidos a los de una modulación DSB tal y como demuestra Marathe (2019).

3.3.2 Construcción del array

Los elementos encargados de la radiación de ultrasonidos para lograr el efecto de la generación de sonido audible serán transductores piezoeléctricos de sección circular y 16mm de diámetro. Concretamente, se han utilizado 10 transductores TCT40 emisores como los de la figura 3.8a para la primera aproximación, conectados en paralelo sobre una protoboard (ver figura 3.8b). Esta primera aproximación no va a ser caracterizada de manera técnica puesto que su cometido es el de demostrar que el efecto de la generación de sonido audible es totalmente viable, por lo que servirá de punto de partida para los arrays que se describen a lo largo de este apartado.

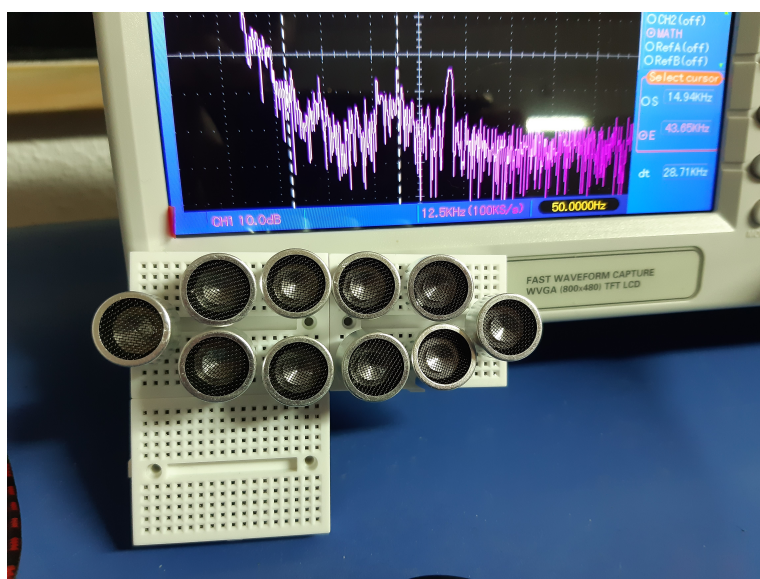


Figura 3.8: Proceso de construcción del array: implementación de la primera aproximación en un array de 10 transductores sobre protoboard como prueba de viabilidad.

Para la segunda implementación se utilizarán 45 transductores TCT40 conectados en paralelo en un array rectangular plano de 9 filas y 5 columnas (ver diseño en la figura 3.9a), y 6 transductores formando un círculo alrededor de un transductor central (ver diseño en la figura 3.9b), ambos soldados a una placa PCB mediante soldadura de estaño.

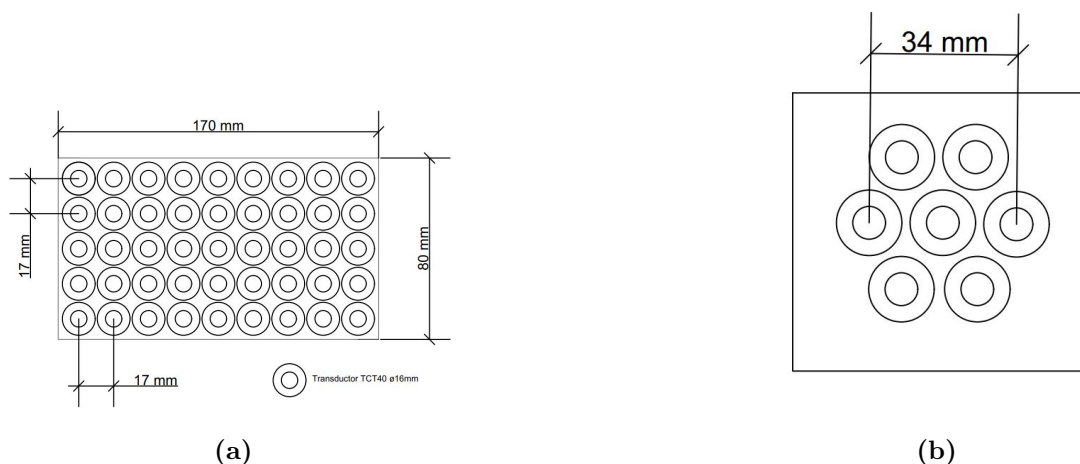


Figura 3.9: Diseño inicial de los arrays a construir en la segunda aproximación: (a) dimensiones del array de 9 x 5 transductores y, (b) dimensiones del array circular de 8 transductores (*fente propia*).

Los transductores irán soldados en paralelo de acuerdo con el circuito eléctrico de la figura 3.10a para ambas implementaciones, obteniendo el resultado de la figura 3.10b. Se deberá garantizar que todos los transductores tengan la misma polaridad para que estos radien en fase.

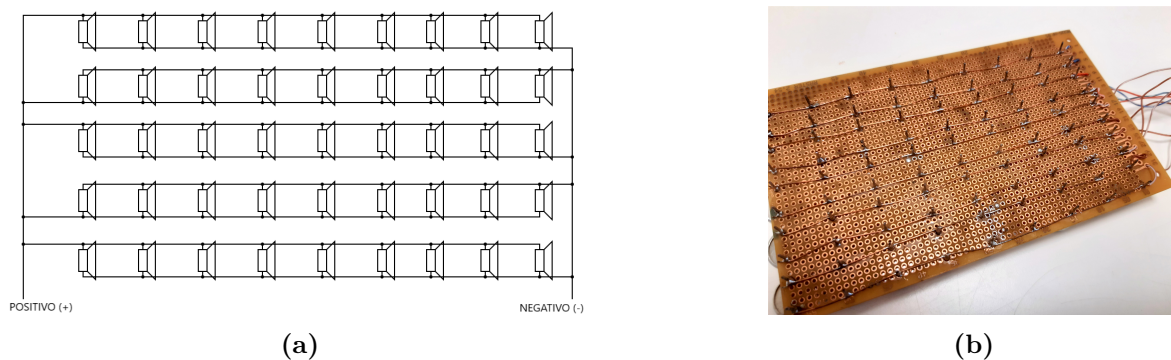


Figura 3.10: Proceso de construcción: (a) esquema eléctrico según la soldadura en paralelo utilizada para los 45 transductores del array rectangular de 9x5 transductores, y (b) vista trasera de la PCB con los transductores soldados.

La primera aproximación por lo tanto, sirvió como prueba de viabilidad comprobando que el nivel de presión audible es proporcional al número de transductores utilizados tras varias pruebas como se muestra en la figura 3.11a. El proceso de soldadura ha sido realizado con la ayuda de los técnicos especialistas en electrónica de la Universidad de Alicante y se puede apreciar en la figura 3.11b.

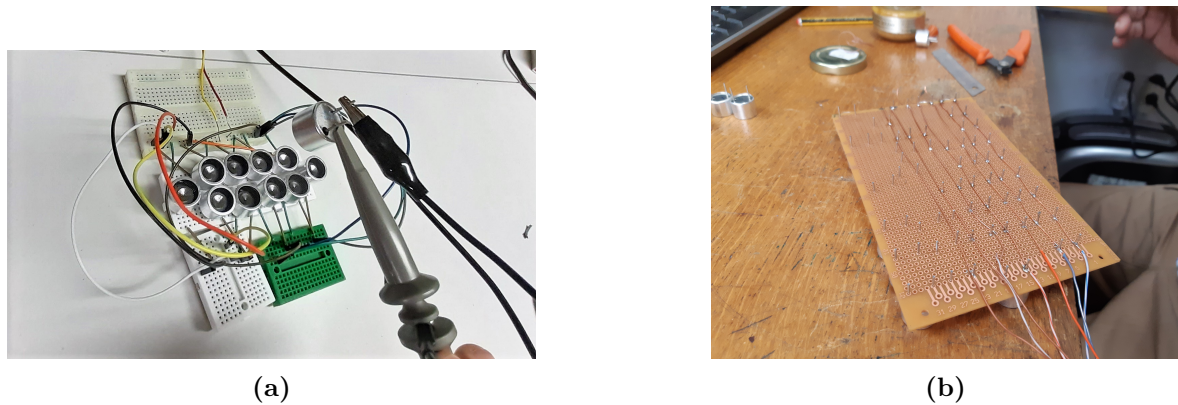


Figura 3.11: Proceso de construcción: (a) imagen de la primera aproximación y, (b) soldadura de estaño en la PCB.

Así, se finaliza la etapa de construcción obteniendo 2 arrays de transductores de ultrasonidos, ilustrado en la figura 3.12 con distintas disposiciones de sus elementos (rectangular y circular), listos para su evaluación y caracterización completa.

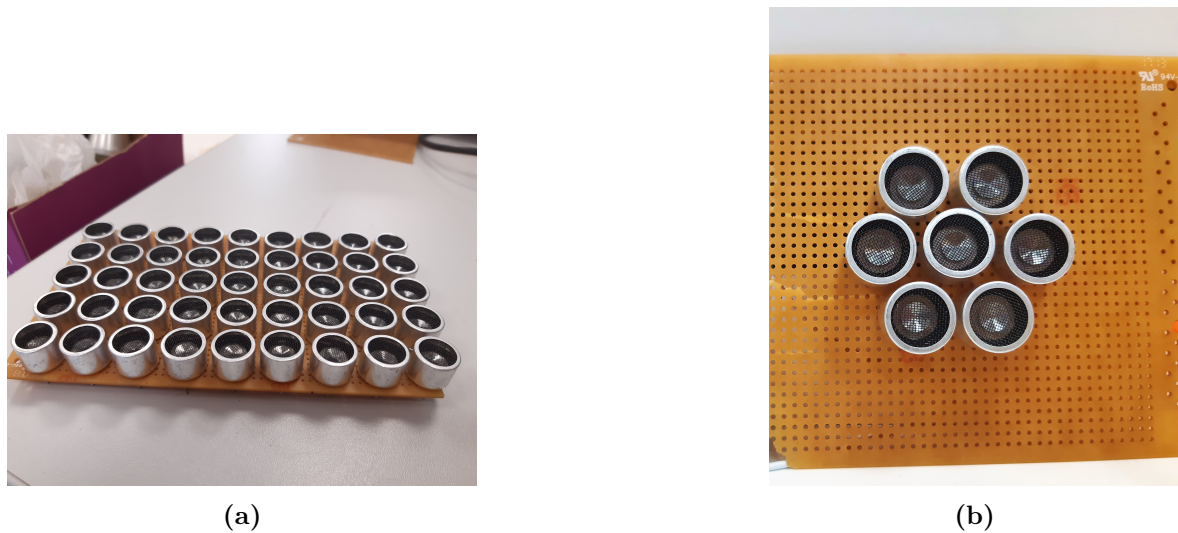


Figura 3.12: Resultado de la construcción: (a) array plano rectangular de 45 transductores y, (b) array plano circular de 8 transductores (*fuentes propias*).

3.4 Medidas experimentales

Una vez contruidos los arrays objeto de investigación, resulta conveniente caracterizarlos y compararlos con altavoces electrodinámicos de características similares, pudiendo observar así las ventajas e inconvenientes de este tipo de altavoces. Para la caracterización mencionada, se propone un banco de medidas experimentales que comprende medidas de:

- El campo acústico radiado a la frecuencia de la portadora (40 kHz).
- Directividad.
- Respuesta en frecuencia.
- Sensibilidad.
- Distorsión armónica total (THD, *Total Harmonic Distortion*).

Para cada una de las medidas mencionadas, será necesario elaborar una configuración apropiada (*setup*) y específica en cada caso, de manera que dicha configuración se adapte y cumpla con los requisitos y particularidades de cada medida. Por ello, se detallará en cada apartado el *setup* utilizado, haciendo referencia al esquema de montaje, el *hardware* y el *software* utilizados. Sin embargo existen dos etapas comunes e invariables a todos los montajes experimentales: (i) la generación de la señal digital, y (ii) la amplificación de la señal analógica a la salida de la tarjeta de sonido (sistema DAQ). La creación de la señal discreta que será enviada al sistema de adquisición que se utilice en cada configuración para su conversión a analógico y posterior amplificación y emisión, será la misma en cada caso (solo variarán parámetros como la frecuencia de muestreo o el índice de modulación). Por esta razón, se ha elaborado un código en MATLAB que implementa una función (Función *generar_tonos_PAL.m*) para generar archivos de audio con las modulaciones descritas en el apartado 2.3.3, tanto para señales monofrecuenciales (tonos puros) como para señales en formato *.wav* importadas por el usuario.

generar_tonos_PAL.m

La función elaborada crea un banco de archivos *.wav* que contienen las modulaciones en amplitud, frecuencia y fase correspondientes a las ecuaciones 2.35, 2.38, 2.39, 2.40, 2.43, 2.46 y 2.48. El esquema de parámetros de entrada y salida de la función se ilustra en la figura 3.13.

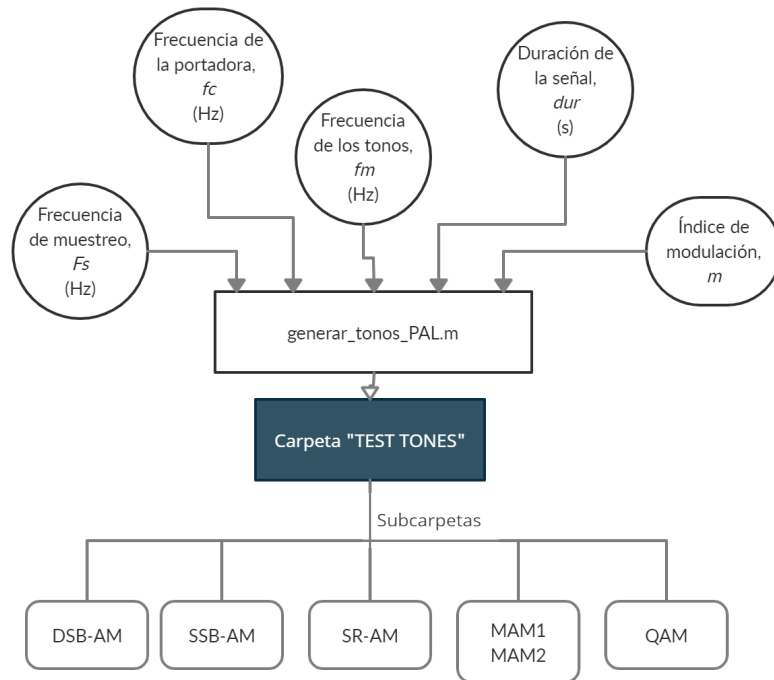


Figura 3.13: Esquema de los parámetros de entrada y salida de la función `generar_tonos_PAL.m`.
Fuente propia

Los parámetros de entrada de la función `generar_tonos_PAL.m` son:

- $F_s \rightarrow$ Frecuencia de muestreo en Hz. Los archivos generados contendrán F_s muestras por cada segundo de duración.
- $f_c \rightarrow$ Frecuencia de la señal portadora en Hz. La amplitud, frecuencia o fase de esta señal se modulará en base a una señal moduladora.
- $f_m \rightarrow$ Señal moduladora. Podrá ser un escalar o un array de valores correspondientes a las frecuencias de los tonos que se deseen modular, o una variable tipo *string* que contenga la ruta completa del archivo *.wav* que se desee importar como señal moduladora.
- $dur \rightarrow$ Duración de la señal modulada en segundos. Todos los archivos *.wav* que se generen durarán dur segundos. Si la señal moduladora se encuentra en formato *.wav*, la señal se recortará para que su duración sea igual a dur .
- $m \rightarrow$ Índice de modulación. Deberá de ser un array de 3 elementos que contenga el índice de modulación para las modulaciones AM, el desvío frecuencial para la modulación FM y el desvío de fase para la modulación PM.

La ejecución de la función creará una carpeta llamada "TEST TONES" en el mismo directorio que la función. Esta se encuentra subdividida en carpetas que contendrán los archivos de audio correspondientes a cada modulación (ver espectros generados en la figura 3.14) para cada una de las frecuencias f_m (o señal *.wav*).

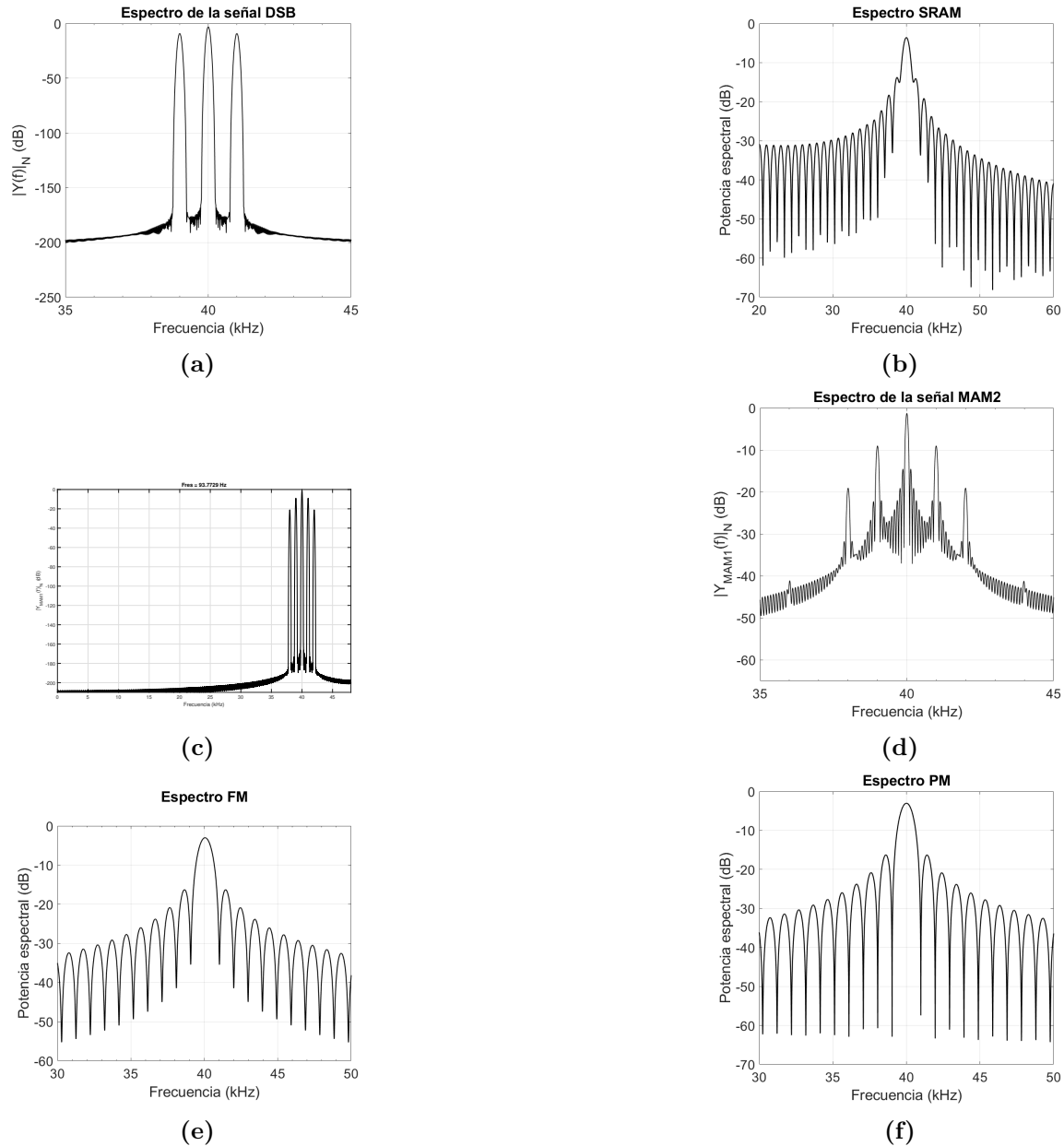


Figura 3.14: Espectros de las modulaciones empleadas: (a) DSB, (b) SRAM, (c) MAM1, (d) MAM2, (e) FM, y (f) PM.

La salida de la tarjeta de adquisición de datos, para cualquiera de los montajes expe-

rimentales, se conectará a la entrada de un amplificador de audio. Teniendo en cuenta las características del proyecto, el amplificador deberá contar con las siguientes especificaciones:

- Capacidad de soportar señales de entrada de $1-10V_{AC}$.
- Ancho de banda cuyo punto superior de potencia mitad sea de al menos 60 kHz (frecuencia máxima para una señal moduladora de 20 kHz de ancho de banda con una portadora de 40 kHz con modulación DSB).
- Distorsión armónica lo más baja posible.

Atendiendo a estas especificaciones, se utilizará el amplificador M500 de la marca InterM (ver figura 3.15a), disponible en el laboratorio de acústica de la Universidad de Alicante, ya que puede amplificar señales de hasta 70 kHz y cuenta con una salida de hasta 500W, consideradas ambas características suficientes para los requisitos del proyecto. Este amplificador será utilizado para alimentar los arrays de la segunda aproximación construidos en el apartado 3.3.2. Para la primera aproximación, ya que no se disponía de un entorno de laboratorio y a fin de evaluar la respuesta de otros amplificadores comerciales, se optó por un amplificador de clase D estéreo STK4152II (ver figura 3.15b) comercializado para la amplificación de señales de audio convencionales. Según las especificaciones de este amplificador, su ganancia está limitada a señales de frecuencia inferior a los 20 kHz. Sin embargo, se ha comprobado que el STK4152II puede amplificar señales de 40 kHz, por lo que se puede considerar apto para la generación de sonido audible con ultrasonidos con portadoras de 40 kHz, aunque con grandes limitaciones en cuanto a la distorsión introducida y potencia de salida ($<50W$) y la necesidad de un transformador simétrico de 24 V.



(a)



(b)

Figura 3.15: Amplificadores utilizados en la experimentación con los arrays de ultrasonidos: (a) Amplificador InterM-M55, y (b) amplificador STK4152II

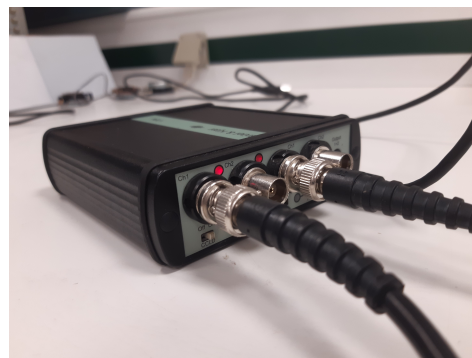
Para el correcto funcionamiento de los sistemas de captación, se colocará un acondi-

cionador de señal B&K 1704 entre el micrófono y la entrada del sistema DAQ a fin de suministrar a los micrófonos la corriente de polarización necesaria además de amplificar su salida.

A modo de observación, en un primer intento en el laboratorio, se llevaron a cabo varias pruebas con el amplificador *Falco Systems WMA-100* (ver figura 3.16a ya que está diseñado para la amplificación de señales en el régimen ultrasónico de hasta 100 kHz con capacidad para amplificar 20 veces la tensión de entrada. Tras varias pruebas, se descartó su uso ya que a pesar de amplificar la tensión, la corriente de salida esta limitada a 250 mA, no cumpliendo así con los requisitos de potencia para los arrays contruidos (la presión audible resultaba prácticamente imperceptible).



(a) FALCO SYSTEMS WMA-100



(b) Acondicionador de señal Bruel & Kjaer 1704

Figura 3.16: (a) amplificador descartado, y (b) acondicionador de señal utilizado en todos los montajes experimentales.

3.4.1 Campo ultrasónico

Para evaluar de manera experimental el campo acústico producido por los arrays contruidos se utilizará el robot de holografía acústica disponible en el laboratorio de acústica de la Universidad de Alicante. Este robot permitirá automatizar el movimiento del micrófono en dos dimensiones del espacio con resolución de hasta 1 mm, garantizando la precisión y un ahorro de tiempo importante. Se llevarán a cabo las siguientes medidas:

- Plano de 50x50 cm perpendicular a la superficie del array a la frecuencia de 40 kHz.
- Línea axial de 50 cm desde la superficie del array.

Se medirá un plano similar al simulado en los modelos analítico y numérico a fin de ilustrar las limitaciones de estos modelos en comparación con los resultados experimen-

tales. El *setup* utilizado para la medida del campo de presión se ilustra en la figura 3.17 así como las características del mismo reflejadas en la tabla 3.3a. Además, se medirá una línea en la dirección del eje del array para evaluar la atenuación de la portadora con la distancia cuyo montaje y características se pueden apreciar en la figura 3.18 y tabla 3.3b respectivamente.

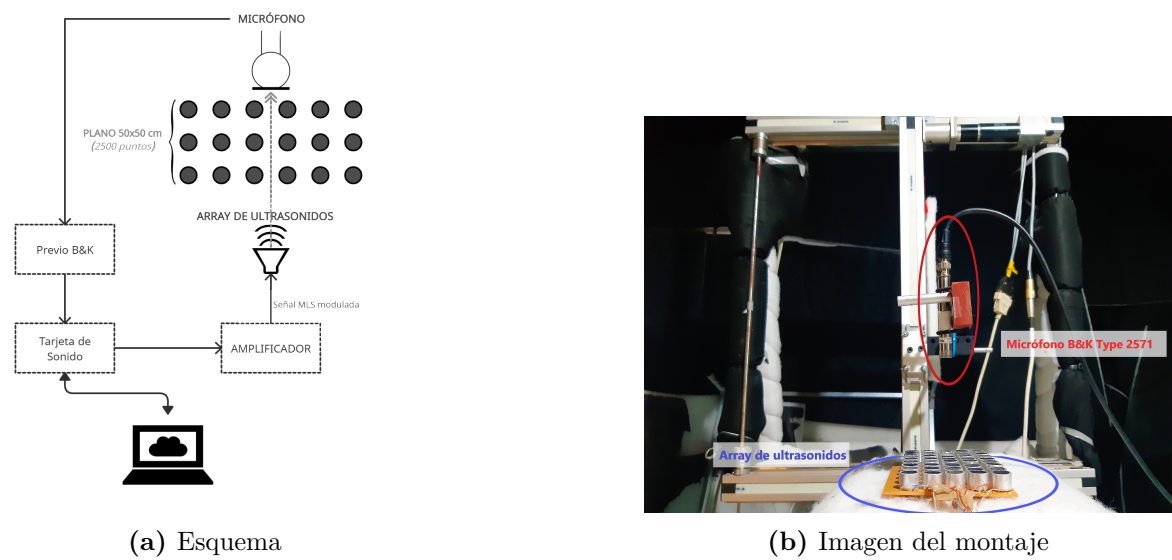


Figura 3.17: Montaje experimental para la medida del campo ultrasónico: (a) esquema, y (b) imagen del setup.

Las características del montaje experimental para la medida del plano de presión se detallan en la tabla 3.3a y las características de la medida de la línea en el eje del array se muestran en la tabla 3.3b.

MEDIDA DEL CAMPO ULTRASÓNICO	
Frecuencia de análisis	40 kHz
Frecuencia de muestreo	96 kHz
Tarjeta de sonido	National Instruments BNC-2110
Micrófono	B&K Type 2571 1/2" / TCT40-R
Amplificador	InterM M500
Preamplificador	B&K 1704
Entorno de medición	semi-anecoico
Dimensiones del plano	50 x 50 cm
Resolución espacial	1 cm en ambos ejes
Total de puntos medidos	2500 pts.
Posición del array	Vertical

(a)

MEDIDA DE PRESIÓN EN EL EJE	
Frecuencia de análisis	40 kHz
Frecuencia de muestreo	800 kHz
Tarjeta de sonido	National Instruments BNC-2110
Micrófono	B&K Type 2571 1/2" / TCT40-R
Amplificador	InterM M500
Preamplificador	B&K 1704
Entorno de medición	semi-anecoico
Dimensiones de la línea	50 cm
Resolución espacial	1 mm
Total de puntos medidos	501

(b)

Tabla 3.3: Características del montaje experimental: (a) medida del campo ultrasónico, y (b) medida de presión en el eje.



Figura 3.18: Medición de una línea axial de 50 cm a la frecuencia de 40 kHz: (a) detalle del montaje, y (b) vista del montaje.

3.4.2 Campo audible: respuesta en frecuencia, directividad, sensibilidad y distorsión

A fin de obtener una caracterización significativa y poder comprobar las ventajas que ofrecen este tipo de arreglos, se somete el array construido a un estudio comparativo en base a:

- la directividad para el rango de frecuencias audible en función de la modulación empleada.
- la respuesta en frecuencia para el rango de frecuencias audible en función de la modulación empleada.

Se compararán los dos arrays contruidos con dos altavoces electrodinámicos de superficies comparables. El transductor electrodinámico convencional utilizado para la comparación con el array rectangular se puede observar en la figura 3.19a, de la marca PASCO y cuya superficie radiante de $6.5^2\pi = 132.73 \text{ cm}^2$ es comparable con la superficie de $17 \cdot 8 = 136.00 \text{ cm}^2$ del array construido. El array circular se comparará con el altavoz electrodinámico VISATON K-50 de la figura 3.19b, ambos de 19.64 cm^2 de superficie efectiva.



(a)



(b)

Figura 3.19: Altavoces electrodinámicos utilizados en el estudio comparativo: (a) PASCO WA-9900 de 13 cm de diámetro, y (b) VISATON K-50 de 5 cm de diámetro.

Las medidas de campo audible producido por el array de ultrasonidos tendrán un espectro similar al de la figura 3.20 donde se distinguen las bandas ultrasónicas de la modulación y el resultado de la interacción no lineal entre ellas.

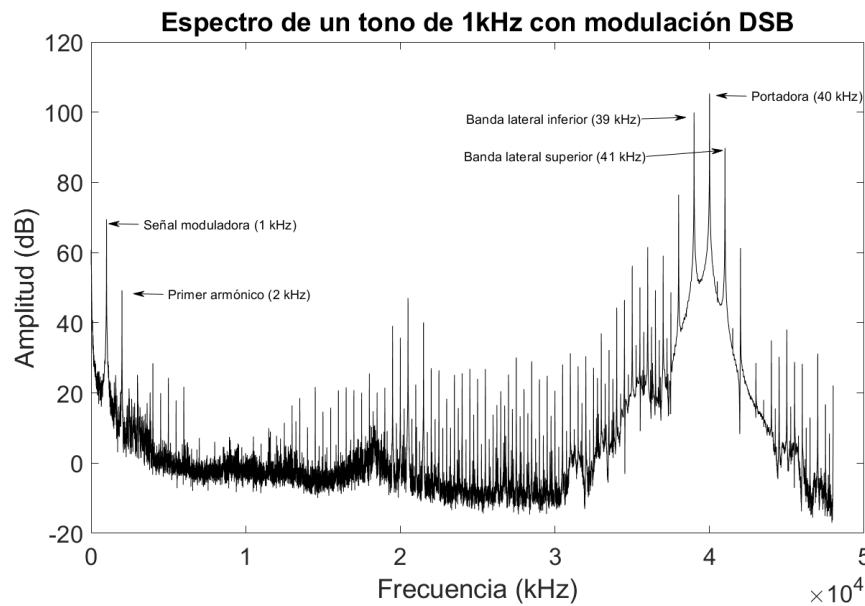
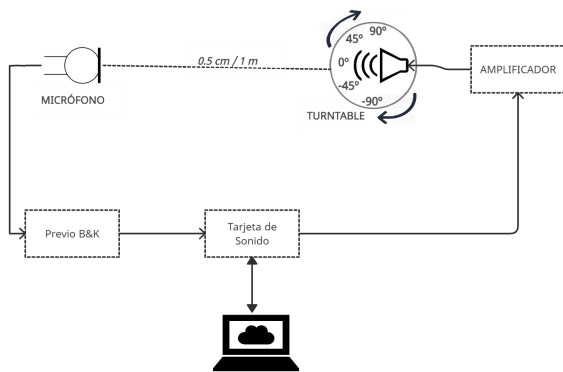


Figura 3.20: Espectro completo medido a 1 m del array de 9x5 para la emisión de un tono de 1 kHz en modulación DSB.

Directividad

Para evaluar la directividad se hará uso de una base giratoria automatizada (*turn-table*) controlada por entornos de LabView que permite realizar mediciones variando el ángulo azimutal con respecto al eje del arreglo (ver figuras 3.21a y 3.21b). Se

emitirá una señal MLS (modulada para los arrays de ultrasonidos) para obtener información de todas las frecuencias del rango audible ya que el espectro de esta señal es similar al del ruido blanco y se dispondrá de un micrófono fijo situado en el eje del arreglo a 50 cm y 1 m. Las características principales del estudio comparativo a realizar se resumen en la tabla 3.4. Este estudio incluye la medida de directividad a 0.5 m y 1 m de los arrays en función de las modulaciones DSB, MAM1, SRAM, FM y PM, con un índice de modulación de 0.9 para las modulaciones en amplitud, una desviación de frecuencia de 1 kHz para la FM, y un desvío de fase de π para la PM. Además, se mide la directividad de los altavoces convencionales de la figura 3.19 para establecer la comparativa entre ambos sistemas de radiación acústica.



(a) Esquema



(b) Imagen de montaje

Figura 3.21: Setup experimental para medir la directividad.

MEDIDA DE DIRECTIVIDAD	
Frecuencia de análisis	100 Hz - 15 kHz
Frecuencia de muestreo	96 kHz
Señal emitida	MLS modulada (<i>longitud</i> = 65535)
Tarjeta de sonido	National Instruments BNC-2110
Micrófono	B&K Type 2571 1/2" / TCT40-R
Amplificador	InterM M500
Preamplificador	B&K 1704
Entorno de medición	semi-anecoico
Distancia	50 cm y 1 m
Rango angular	180°
Resolución angular	2.5°

Tabla 3.4: Características de la medida de directividad

Respuesta en frecuencia.

La respuesta en frecuencia será evaluada a través del espectro obtenido a 1 m del array con la emisión de la señal MLS del apartado anterior. Se utilizará el montaje de la figura 3.22 que también será válido para la medida del THD.

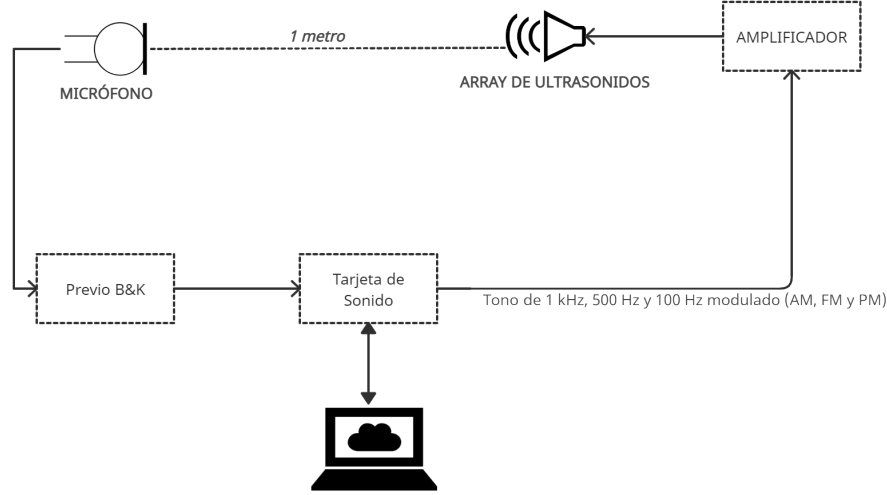


Figura 3.22: Esquema del montaje experimental para medir la respuesta en frecuencia de los dispositivos sometidos al estudio comparativo.

Distorsión armónica

Para completar la caracterización del arreglo construido se evaluará la distorsión armónica mediante el parámetro THD(%) (*Total Harmonic Distortion*) a la distancia de 1m. El parámetro THD (ec. 2.34) se evaluará a través del espectro medido a 1 metro en el eje del array para tonos de 1 kHz, 500 Hz y 100 Hz con las modulaciones DSB, MAM1, SRAM, FM y PM de las ecuaciones 2.35, 2.40, 2.39, 2.46 y 2.48 respectivamente, utilizando el mismo montaje que para la respuesta en frecuencia (ver figura 3.22). Se utilizará el software ARTA para medir el nivel de presión del espectro audible a 1 metro y se considerarán únicamente los 2 primeros armónicos para la obtención de este parámetro. Se calculará el THD mediante la ecuación 2.34 convirtiendo previamente el nivel de presión de cada armónico SPL_n a valores de presión/tensión V_n tal que

$$V_n = 2 \times 10^{-5} \cdot 10^{SPL_n/20} \quad (3.1)$$

4 Resultados

Los resultados de las implementaciones analíticas y numéricas, así como los resultados obtenidos experimentalmente, se muestran en este capítulo de acuerdo con el esquema de la figura 4.1.

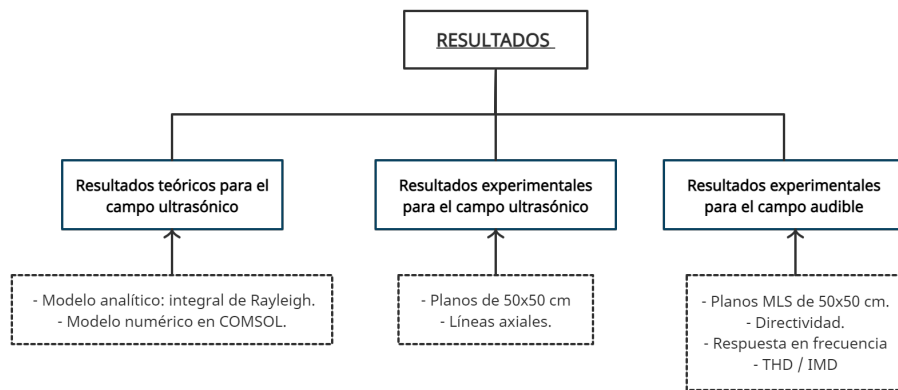


Figura 4.1: Organización de los resultados

4.1 Resultados teóricos para el campo ultrasónico

Propagación no lineal: ecuación de Burguers

Para valorar los efectos no lineales que sufren las ondas de alta presión en su propagación, se muestran los resultados de la figura 4.2 obtenidos para la implementación analítica de la solución a la ecuación de Burguers.

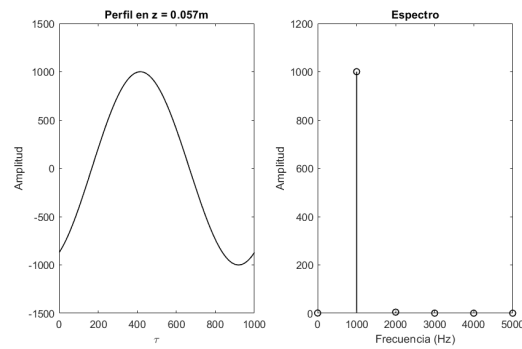
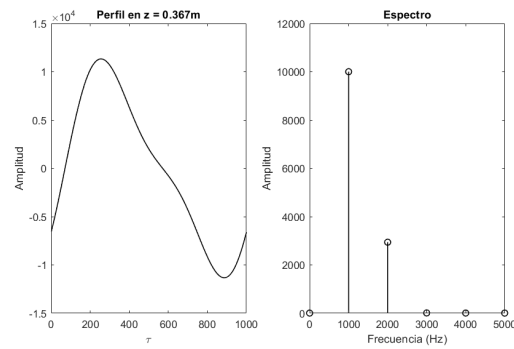
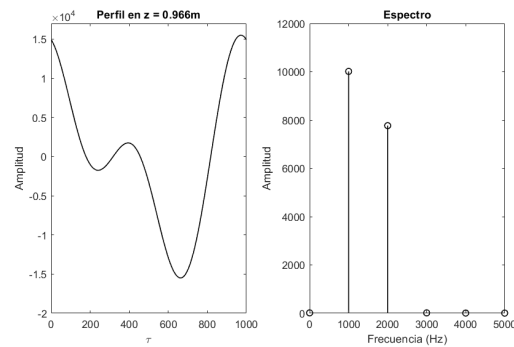
(a) $z = 0.057\text{m}$ (b) $z = 0.367\text{m}$ (c) $z = 0.966\text{m}$

Figura 4.2: Resultados para la solución a la ecuación de Burgers resulta por el método de las aproximaciones sucesivas.

Se aprecia claramente cómo el perfil de la onda emitida (un tono sinusoidal monofrecuencial) sufre de distorsión a medida que se propaga a lo largo del eje z , por lo que aparece un primer armónico a 2 kHz fruto de esa distorsión.

Radiación ultrasónica

Se mostrará una comparativa entre los resultados obtenidos con el modelo analítico y el modelo numérico para cada simulación. El modelado analítico y numérico del array construido, bajo las aproximaciones y limitaciones que se describirán a continuación, resulta de gran utilidad puesto que permite obtener una primera idea sobre cómo será el campo de presión audible producido por el array, ya que este contará con propiedades directivas similares a las del campo ultrasónico. En primer lugar, para justificar el empleo de un conjunto de transductores en lugar de un solo elemento, se muestra el campo de presión a 40 kHz para un solo pistón en la figura 4.3. Se observa un claro lóbulo principal de tendencia directiva acompañado de dos débiles lóbulos laterales. Al consistir el modelo en un único transductor, no se da una región de interferencias de campo cercano apreciable ya que la distancia de Rayleigh (ec.2.26) para esta configuración es de 6 mm. El nivel de presión obtenido con un solo transductor a 40kHz ($<90\text{dB}$) no resulta suficiente para cumplir con los principios de diseño enunciados en el capítulo anterior, por lo que se emplearán arrays de transductores.

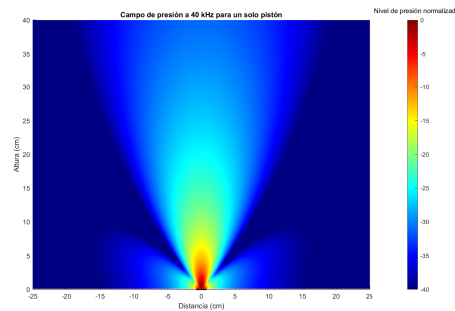


Figura 4.3: Resultados del modelo analítico: campo de presión radiado por un solo pistón.

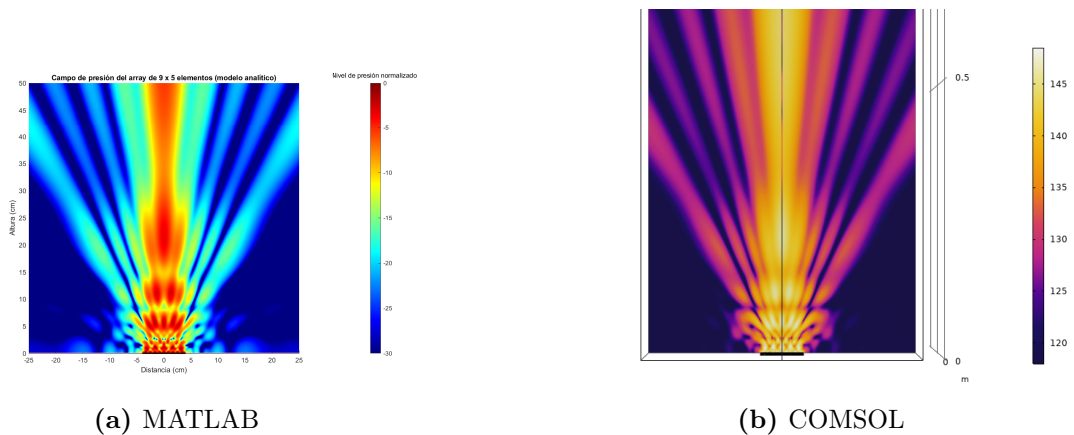


Figura 4.4: Resultados teóricos del campo ultrasónico: (a) modelo analítico, y (b) modelo numérico.

Implementada la integral de Rayleigh (ec. 2.24) para el array de 45 transductores modelados como pistones radiantes, se obtienen los resultados de la figura 4.4. Para este caso, la distancia de Rayleigh resulta ser de **0.65 metros** por lo que se puede apreciar claramente el efecto de las interferencias en el campo cercano, sobre todo en los primeros 20 cm. Considerando una longitud efectiva del array igual a su diagonal, esto es 20 cm, el ancho total del rayo será de **43°** según la ecuación 2.29. El modelo numérico (BEM) implementado en COMSOL Multiphysics resulta idéntico al predicho por la integral de Rayleigh en el modelo analítico como se puede apreciar en la figura 4.4b.

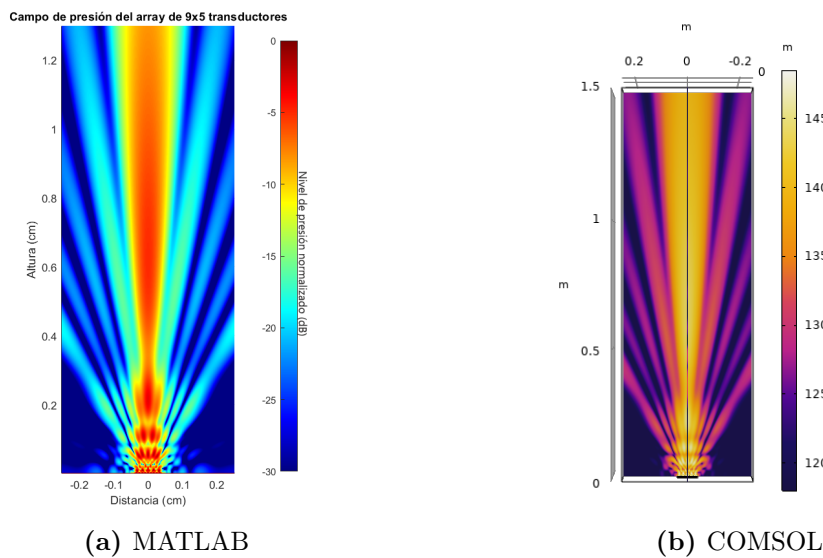


Figura 4.5: Ampliación del plano de cálculo para los modelos analítico (MATLAB) y numérico (COMSOL).

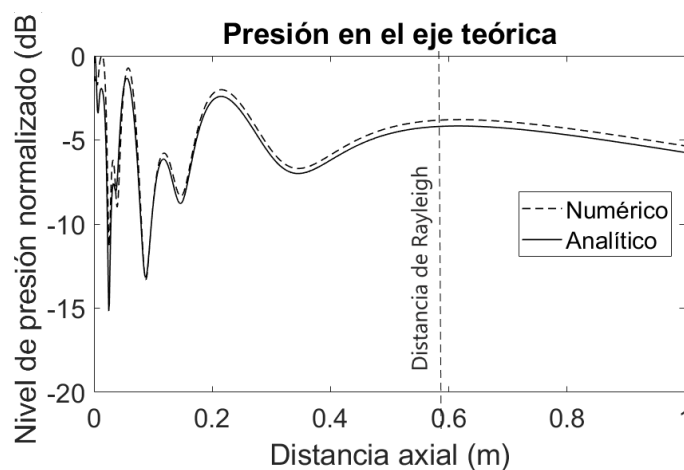


Figura 4.6: Resultados de nivel de presión en el eje de los modelos analítico y numérico.

Puesto que los planos de 50x50 cm no aportan información sobre la presión a partir de la distancia de Rayleigh, se ha simulado otro plano de 150 cm obteniendo el campo de presión en la figura 4.5 y la presión en el eje de la figura 4.6. Como se puede apreciar en la figura 4.6, la presión en los primeros 60 cm desde la superficie del arreglo está afectada por las interferencias causadas por todos los pistones entre sí, así podemos concluir que la integral de Rayleigh resulta de utilidad para predecir la presión en el campo cercano.

4.2 Resultados experimentales para el campo ultrasónico

Se han llevado a cabo medidas de presión para planos de 50x50 cm en la dirección del eje del array, obteniendo los resultados de la figura 4.7.

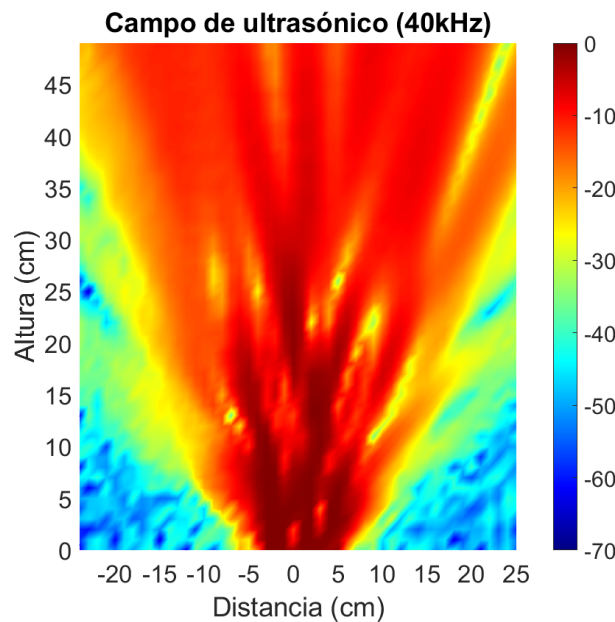


Figura 4.7: Resultados experimentales del campo ultrasónico.

Es evidente que el resultado experimental no se asemeja a las predicciones analíticas o numéricas. Esto es debido a que estos modelos no contemplan la geometría exacta del problema, ya que los transductores utilizados no tienen una geometría plana y circular como la de los pistones implementados y además en la implementación real los transductores poseen una separación de 1 mm entre elementos, no considerada en el modelo analítico. Los transductores TCT40-T poseen una rejilla en su superficie y un elemento radiante pegado a la cerámica piezoeléctrica que presenta una cierta concavidad y de radio menor al considerado para los pistones ($<8\text{mm}$), por lo que no se pretende realizar una validación ni comparación de los

modelos teóricos. Además, la resolución de la medida es de 1 cm, superando la longitud de onda a medir (8mm) y el entorno de medición puede afectar de manera considerable en los resultados si existen reflexiones que produzcan alteraciones en la medida. A pesar de esto, es igual de evidente que el array posee una clara directividad para la frecuencia de 40 kHz, siendo esto lo esperado ya que el campo audible generado contará también con esta directividad como se ilustrará en el apartado siguiente.

En cuanto a la evolución de la portadora a lo largo del eje del array, se obtienen los resultados de la figura 4.8.

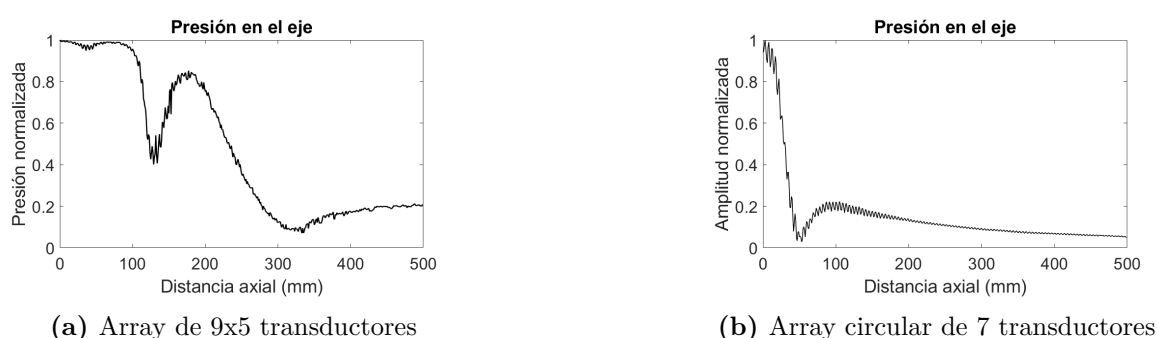


Figura 4.8: Resultados de la presión en el eje.

Se observa la variabilidad de la presión en el eje resultante de las interferencias de campo cercano para el array de 45 transductores. Como la distancia de Rayleigh para el array de 45 elementos es superior a las dimensiones plano medido, no se puede apreciar si habrá algún otro máximo a partir de los 50 cm.

4.3 Resultados experimentales para el campo audible

Gracias a la emisión de una señal MLS modulada en amplitud se han obtenido registros de 2500 puntos con información sobre el campo audible. Para esta medida, la resolución de 1 cm resulta suficiente para visualizar el campo audible ya que las longitudes de onda a medir serán muy superiores a las del régimen ultrasónico. Para confirmar que la radiación del campo audible será similar a la del campo ultrasónico, ventaja principal de este tipo de arrays, se muestran los resultados de la figura 4.9 para 1 kHz.

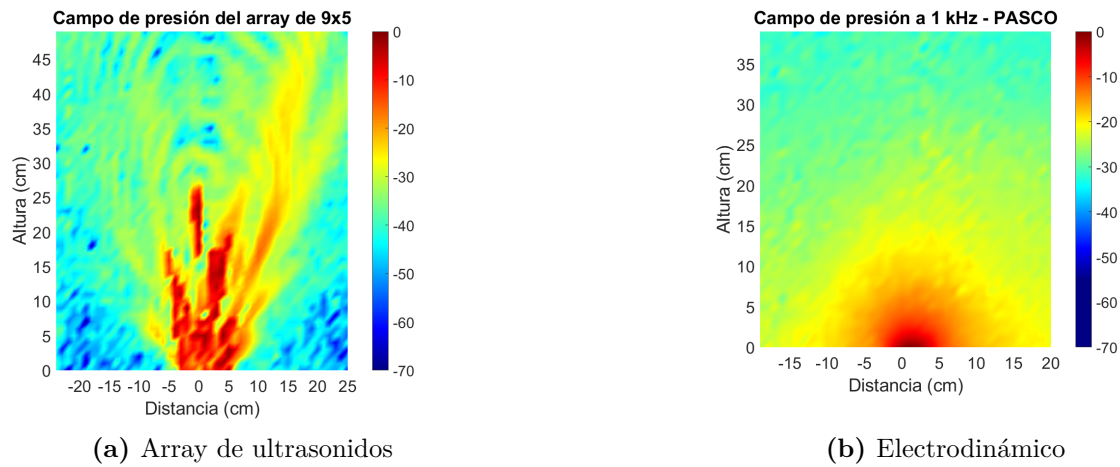


Figura 4.9: Resultados experimentales del campo audible: (a) array de 9x5 elementos, y (b) altavoz electrodinámico PASCO.

4.3.1 Respuesta en frecuencia

Las curvas de respuesta en frecuencia medidas 1 m con una señal MLS modulada se muestran en la figura 4.10.

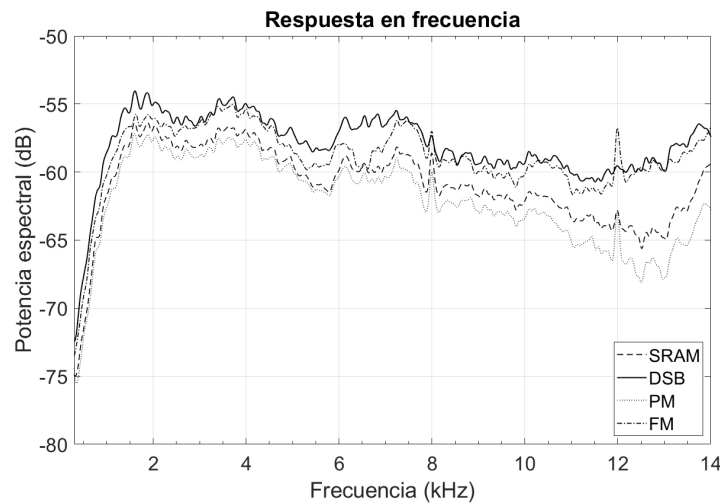


Figura 4.10: Resultados para la respuesta en frecuencia del array de 9x5 transductores.

Esta figura sirve para confirmar una de las principales desventajas de este tipo de arrays: la radiación en baja frecuencia necesita de grandes niveles de presión de la portadora para resultar audible. La respuesta más estable del array se encuentra en torno a la media frecuencia (1 kHz - 7 kHz) por lo que podría resultar de interés su aplicación para reproducir señales de voz.

4.3.2 Sensibilidad

Los niveles de presión audibles obtenidos con el array rectangular para cada una de las modulaciones que se han considerado en la comparativa, se muestran en la figura 4.11. No se ha considerado la sensibilidad del array circular puesto que el nivel de presión audible será menor por contener solamente 7 transductores.



Figura 4.11: Resultados de sensibilidad para el array de 9x5 elementos para las modulaciones implementadas.

Se observa que la modulación FM es la que más nivel de presión ofrece, mientras que la modulación SRAM resulta ser la que menor nivel de presión audible genera.

4.3.3 Directividad

La directividad del array de 45 elementos construido ha resultado ser mucho mayor a la del altavoz electrodinámico con el que se ha comparado como se puede apreciar en las figuras 4.12, 4.15 y 4.14. Incluso para frecuencias como 500 Hz, donde los altavoces electrodinámicos convencionales resultan totalmente omnidireccionales, se aprecia una clara directividad con ausencia de lóbulos laterales.

Los diagramas polares de la figura 4.12 ofrecen una comparativa entre las modulaciones implementadas en la sección anterior, con un índice de modulación de 0.8, radiadas por el array de 45 transductores a 1 metro. Se ha concentrado el estudio en la comparación de 5 modulaciones (DSB, MAM1, SRAM, FM y PM) ya que son las que mayor nivel de presión ofrecían. La directividad de las modulaciones FM y PM es similar, por lo que solamente se muestra la directividad para la modulación FM. Atendiendo a la directividad de la modulación DSB de la figura 4.12, se observa que el corte por -5 dB está antes de los 30°, teniendo un ancho de haz de aproximadamente 45°. Cabe destacar, que el no observar una simetría exacta como se puede esperar para esta medida, puede deberse a dos factores: (i) reflexiones producidas en la medidas que aumenten el nivel de presión para algunos ángulos, y (ii) que el micrófono

no se encuentre lo suficientemente centrado en el eje del arreglo. Aún así, estos factores no imposibilitan apreciar la alta directividad del array construido.

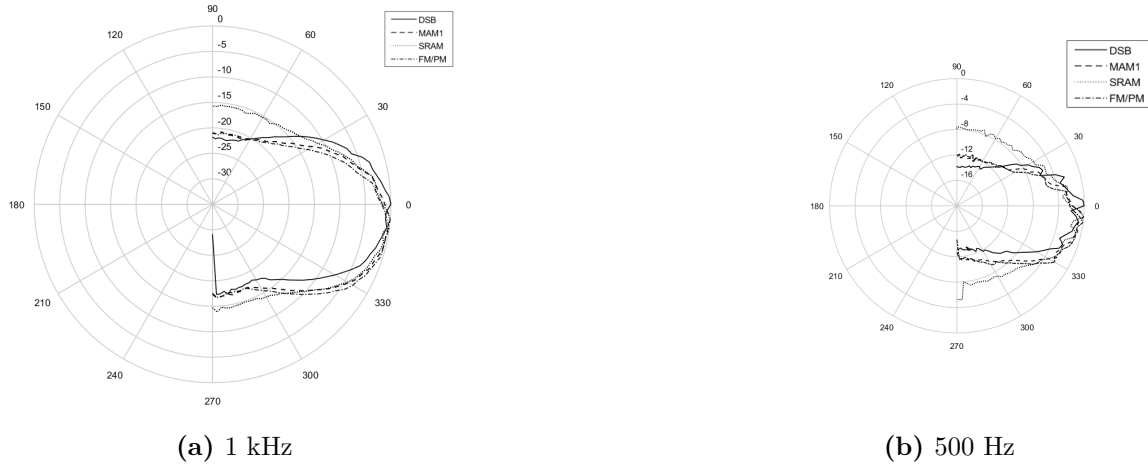


Figura 4.12: Resultados de directividad del array de 9x5 transductores para las modulaciones empleadas.

La figura 4.13 muestra la directividad del altavoz convencional a 1 kHz, pudiendo compararla con las gráficas anteriores y observando la omnidireccionalidad de la fuente.

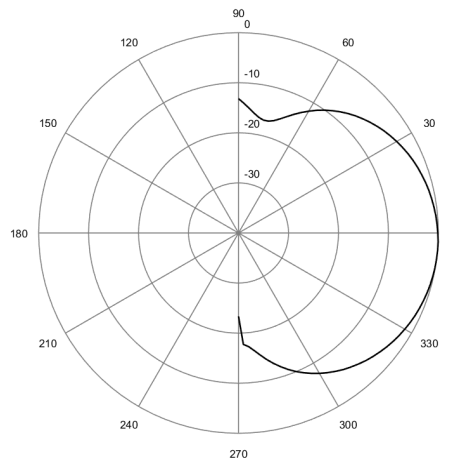


Figura 4.13: Diagrama polar de directividad para el altavoz electrodinámico PASCO WA990 a 1 kHz y 1 m.

Los diagramas polares resultan de gran utilidad a la hora de evaluar la directividad a una o varias frecuencias. Sin embargo, para mostrar toda la información espectral disponible,

se ha optado por gráficas como las de la figura 4.15, que permiten ver el nivel de presión normalizado del array para el espectro audible y para todos los ángulos medidos en forma de mapa de calor.

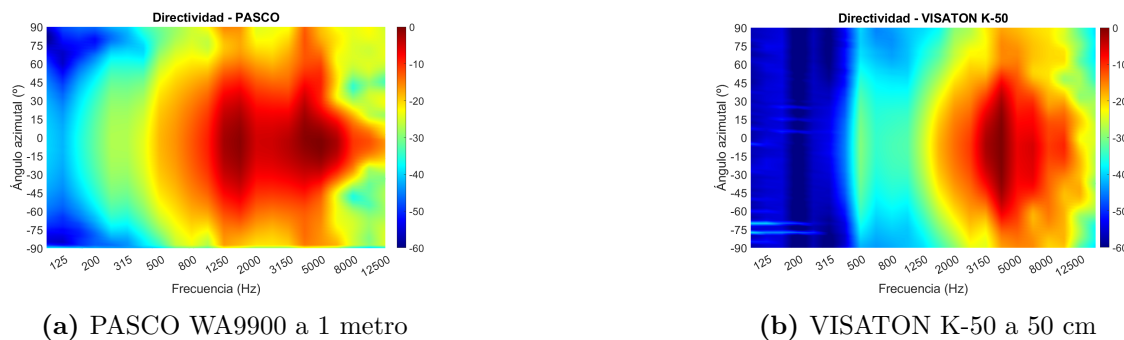


Figura 4.14: Resultados de directividad de los altavoces electrodinámicos.

Comparando las figuras 4.15 y 4.14 se puede apreciar claramente la gran ventaja de los arrays de ultrasonidos para la generación de sonido audible: su directividad. Para los arrays construidos, la caída de presión de 20 dB se mantiene dentro de un ángulo de 40° en cualquiera de las direcciones mientras que los altavoces electrodinámicos abarcan prácticamente todo los ángulos azimutales medidos para la mayoría de frecuencias en las que radian.

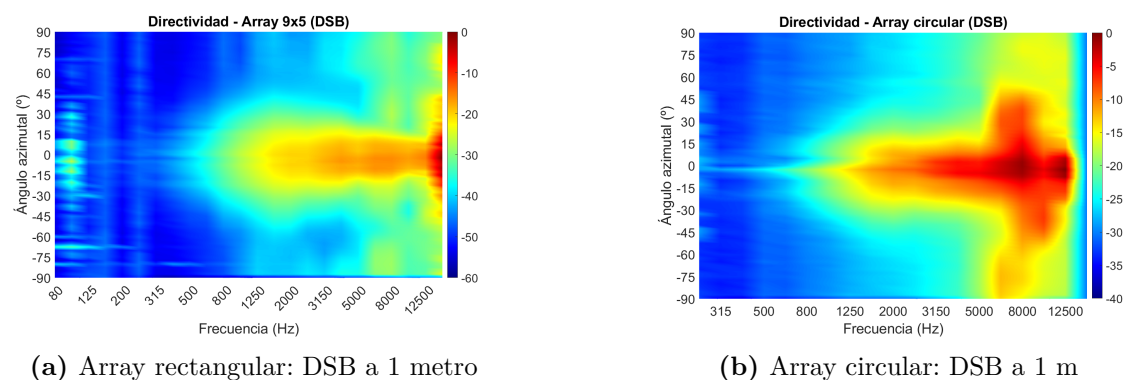


Figura 4.15: Resultados de directividad del array de 9x5 transductores (Ángulo Vs. Frecuencia Vs. Nivel de presión normalizado).

En los gráficos de la figura 4.14 se aprecia claramente la tendencia omnidireccional de los altavoces electrodinámicos. Además, esta figura sirve para ilustrar el comportamiento de la directividad de los altavoces convencionales, ya que se observa como el altavoz electrodinámico PASCO WA9900 de 13 cm de diámetro comienza a ser directivo a partir de los 5 kHz, cuando la longitud de onda radiada (68 mm) comienza a ser comparable con su radio (65 mm).

La ecuación 2.32 permite comparar el comportamiento directivo de las fuentes en base a un parámetro, obteniendo los resultados de la figura 4.16.

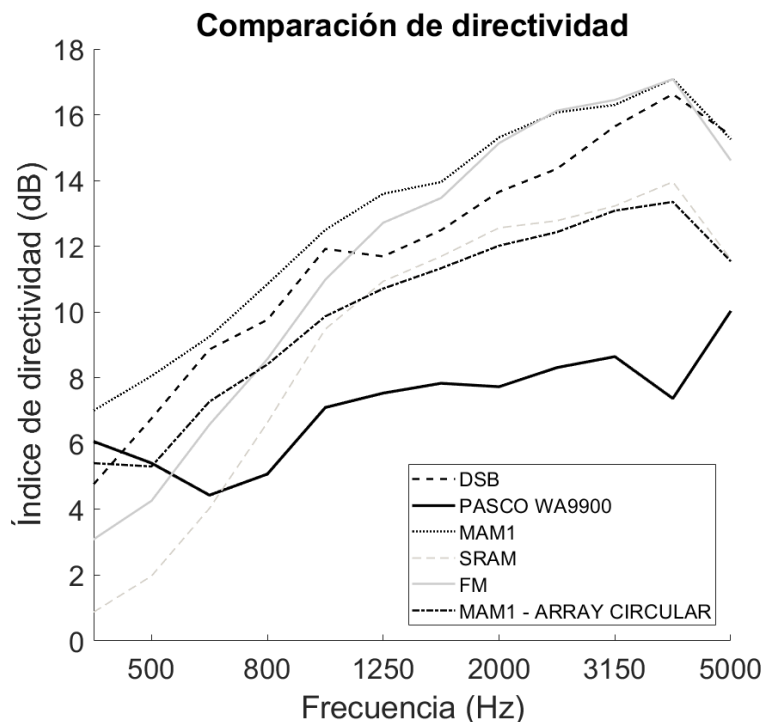


Figura 4.16: Comparativa del índice de directividad obtenido para cada modulación y para el altavoz convencional.

4.3.4 Distorsión armónica

Los resultados de distorsión armónica total para las modulaciones empleadas, considerando los 2 primeros armónicos ($2f$ y $3f$), se muestran en la figura 4.17.

Con estos resultados confirmamos la tendencia de la predicción de Berkay (ec. 2.30) en la que la distorsión aumenta con el índice de modulación, siendo la elección de este parámetro una solución de compromiso entre nivel de presión audible y distorsión armónica total. En vista de estos resultados, se justifica el uso de técnicas de precompensación empleadas en las modulaciones SRAM y MAM1; el nivel de distorsión es menor en estas modulaciones que en la modulación DSB, siendo la SRAM la que menor distorsión presenta tal y como predice la teoría a pesar de que los transductores cuentan con un ancho de banda limitado y no pueden radiar todos los armónicos introducidos por esta modulación para contrarrestar los efectos de la distorsión.

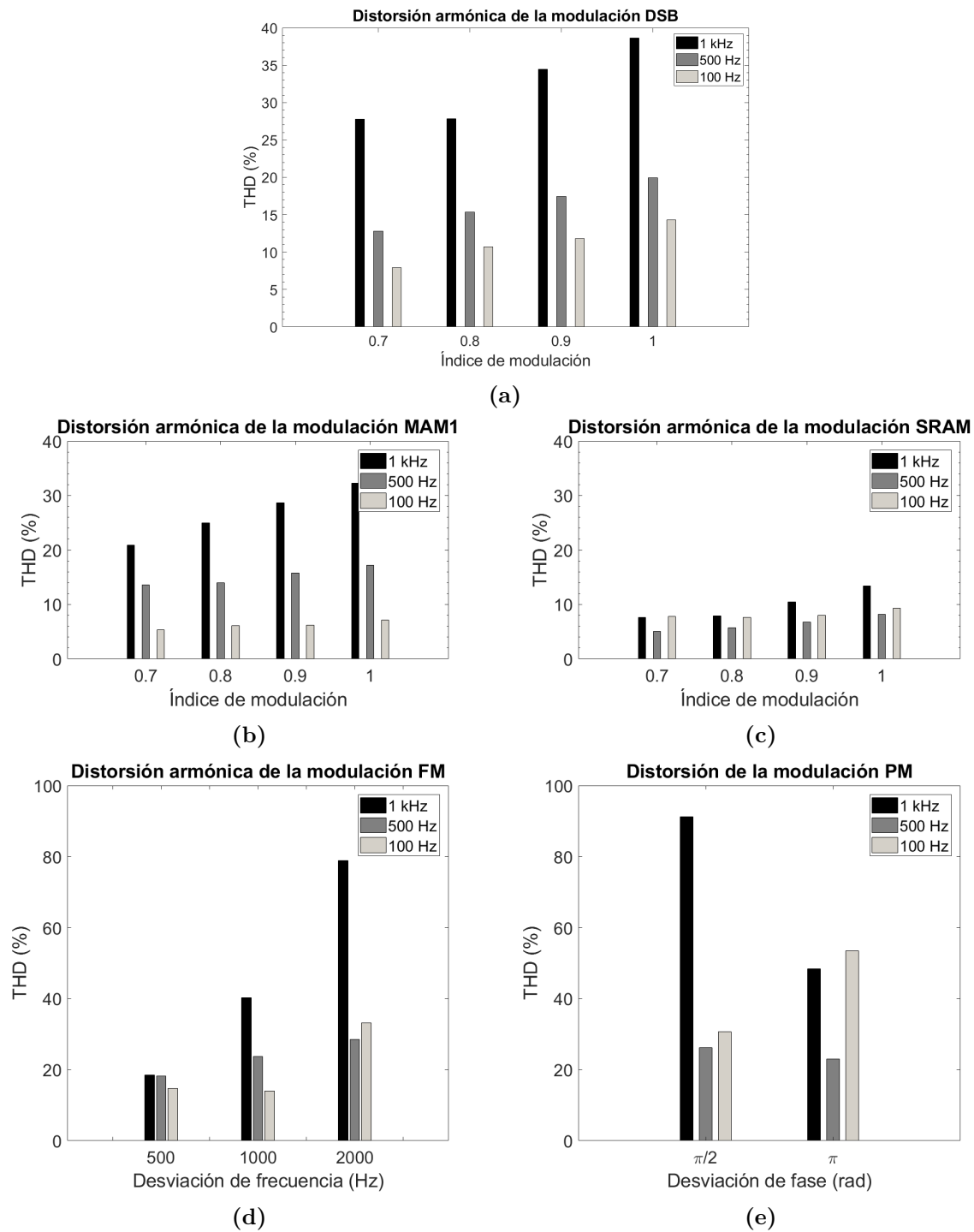


Figura 4.17: Resultados del índice de distorsión armónica total para las modulaciones en amplitud, frecuencia y fase: (a) DSB, (b) MAM1, (c) SRAM, (d) FM, y (e) PM.

En las gráficas de las figuras 4.18 se observa el efecto de las modulaciones no lineales en

comparación con las modulaciones en amplitud: introducen una gran cantidad de armónicos que se traducen en distorsión armónica audible.

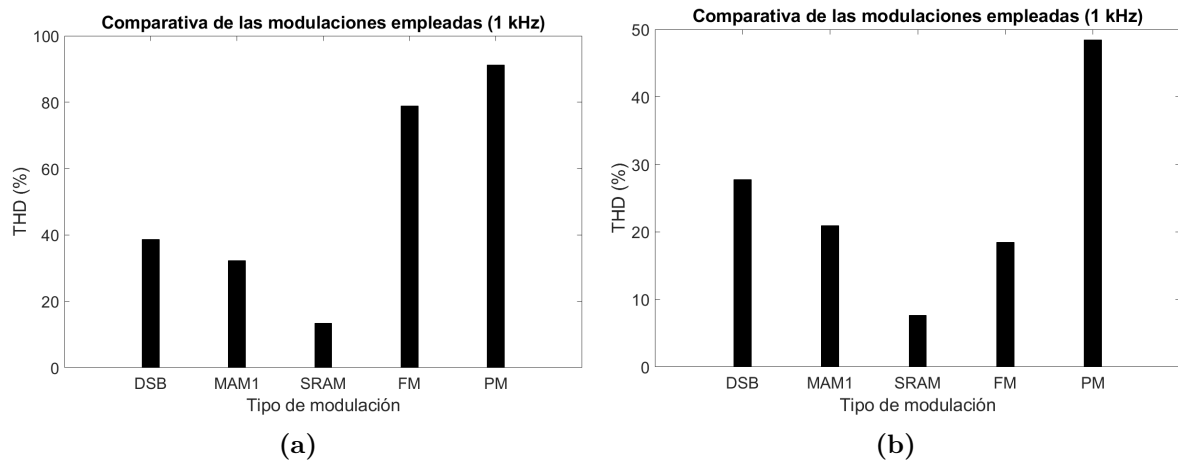


Figura 4.18: Comparativa entre la distorsión armónica producida por las modulaciones: (a) distorsión para $m = 1$, desviación de frecuencia de 1 kHz y desvío de fase de π , y (b) distorsión mínima obtenida para cada modulación.

5 Conclusiones y trabajo futuro

El trabajo de fin de grado expuesto en esta memoria reúne un gran número de herramientas y conceptos aprendidos durante la realización del grado en ingeniería de sonido e imagen en telecomunicaciones. Pone en práctica conceptos generales del ámbito de las telecomunicaciones como las modulaciones y el tratamiento digital de la señal, y las aplica en un contexto de especialización en la rama de ingeniería acústica bajo el marco de la acústica lineal y no lineal.

El objetivo principal de este proyecto era crear un array de ultrasonidos apto para la observación del fenómeno de la generación de sonido audible con ultrasonidos. La caracterización del array construido, de 45 transductores piezoeléctricos, confirma las ventajas de este tipo de altavoces en comparación con los altavoces electrodinámicos convencionales. El array de ultrasonidos ofrece una directividad elevada y además, esta directividad no presenta una variación con la frecuencia tan acusada como su equivalente electrodinámico, pudiendo obtener haces de sonido estrechos ($<40^\circ$) hasta para la baja frecuencia. Pese a que la sensibilidad obtenida puede no ser suficiente para algunas aplicaciones, la respuesta en frecuencia obtenida es de tendencia plana para el espectro audible, salvo para la baja frecuencia donde se necesitan mayores niveles de presión en la portadora. La gran directividad del array permite la creación de fuentes virtuales mediante la reflexión del rayo sonoro en superficies reflectantes, por lo que a un oyente le será difícil conocer la posición de la fuente original al escuchar la reflexión. Además, se ha llevado a cabo un acercamiento a la acústica no lineal mediante el estudio de las ecuaciones en las que se basa y la implementación de soluciones analíticas que permiten ver la distorsión que sufre una onda en su propagación por los efectos no lineales del medio.

Como trabajo futuro, se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Aumentar el número de transductores a fin de conseguir mayores niveles de presión de la portadora, y por lo tanto, mayores niveles de presión audible.
- Implementar técnicas de *beamforming* y *beamsteering* aplicando la teoría de *phase arrays*.
- Valorar las aplicaciones prácticas de este tipo de arrays como su comportamiento en

espacios cerrados o su aplicación en técnicas de cancelación de ruido activa mediante algoritmos adaptativos.

- Introducir nuevos conceptos en la generación de las señales emitidas por el array (modulaciones) como el concepto electroacústico de multivía, utilizando distintas modulaciones según el rango de frecuencias a modular.
 - Utilizar transductores con mayor ancho de banda a fin de reducir la distorsión armónica introducida por el array.
-

Bibliografía

- Beléndez, A. (1992). *Acústica, fluidos y termodinámica*. Universidad de Alicante.
- Bennett, M. B., y Blackstock, D. T. (1975). Parametric array in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 57(3), 562-568. doi: 10.1121/1.380484
- Berktaý, H. O. (1965, octubre). Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications. *Journal of Sound Vibration*, 2(4), 435-461. doi: 10.1016/0022-460X(65)90122-7
- Beyer, R. T. (1974). *Nonlinear acoustics*. Mc Graw-Hill Book Company.
- Bjørnø, L. (2010). Introduction to nonlinear acoustics. *Physics Procedia*, 3(1), 5-16. (International Congress on Ultrasonics, Santiago de Chile, January 2009) doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.003>
- Cheeke, J. D. N. (2002). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC Press.
- Christensen, S., y Olhoff, N. (1998). Shape optimization of a loudspeaker diaphragm with respect to sound directivity properties. *Control and Cybernetics*, 27, 177-198.
- Cotaras, F. D. (1991). A design proposal for an inexpensive parametric array..
- David G. Browning, W. L. K., Mark B. Moffett. (2009). *Parametric acoustic array development at the us navy's new london, connnecticut laboratory* (Vol. 6). Portland, Oregon: Acoustical Society of America.
- Edrich, J. (1976). 3.2. parametric amplifiers. En M. Meeks (Ed.), *Astrophysics* (Vol. 12, p. 225-245). Academic Press. doi: [https://doi.org/10.1016/S0076-695X\(08\)60688-2](https://doi.org/10.1016/S0076-695X(08)60688-2)
- Everest, F. A. (2001). *The master handbook of acoustics*. Mc Graw-Hill Book Company.
- Faruque, S. (2017). *Radio frequency modulation made easy by saleh faruque*. (1st ed. 2017. ed.). Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer.
- Geng, y Yuting. (2019). Virtual bass enhancement based on harmonics control using missing fundamental in parametric array loudspeaker..

- Geravandi, S., Takdastan, A., Zallaghi, E., Vousoghi Niri, M., Mohammadi, M. J., Saki, H., y Naiemabadi, A. (2015). Noise pollution and health effects. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 7(1), e60312. doi: 10.5812/jjhs.25357
- González Salido, N. (2010). *Análisis numérico de parámetros de calidad en haces focalizados* (Tesis de Master no publicada). Universidad Politécnica de Valencia.
- Gyani Shankar Sharma, A. S. (2019). Directivity based control of acoustic radiation. *ELSEVIER*, 154, 226–235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.04.031>
- Hermann L. F. Helmholtz, M. (1885). *On the sensations of tone*. MLongmans, Green, and Co.
- H. O. Berktaý, C. A. A.-T. (1971). Scattering of Sound by Sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 50(181). doi: <https://doi.org/10.1121/1.1912618>
- Jiménez-Gambín, S., Jiménez, N., Benlloch, J. M., y Camarena, F. (2019, Jul). Holograms to focus arbitrary ultrasonic fields through the skull. *Phys. Rev. Applied*, 12, 014016. doi: 10.1103/PhysRevApplied.12.014016
- Jiménez, N. (2015). *Nonlinear acoustic waves in complex media* (Tesis de Master no publicada). Universitat Politècnica de València.
- Kampinga, R. (2010). *Viscothermal acoustics using finite elements. analysis tools for engineers* (Tesis de Master, University of Twente, The Netherlands). doi: 10.3990/1.9789036520507
- Lathi, B., y Ding, Z. (2009). *Modern digital and analog communication systems*. Oxford University Press.
- Lawrence E. Kinsler, A. B. C. . J. V. S., Austin R. Frey. (2000). *Fundamental of acoustics*. Hamilton Press.
- Lee, Y.-S. (1993). *Numerical Solution of the Kzk Equation for Pulsed Finite Amplitude Sound Beams in Thermoviscous Fluids* (Tesis Doctoral no publicada). THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN.
- Leo L. Beranek, T. J. M. (2012). *Acoustics: Sound fields and transducers*. Academic Press.
- Marathe, V. A. (2019). *Analog single sideband-pulse woth modulation processor for parametric acoustic arrays* (Tesis de Master no publicada).
-

- Masashi Yamada, Y. K., Nobuyuki Itsuki. (2004). *Adaptive directivity control of speaker array* (Vol. 3). Kunming, China: IEEE, <https://lcn.loc.gov/2004109108>.
- Nikolaos Kournoutos, J. C. (2019). *Directivity control using a structural actuator array*. Montreal, Canada.
- Novikov, B., Rudenko, O., y Timoshenko, V. (1987). *Nonlinear underwater acoustics*. ASA, AIP.
- OMS. (2011). Burden of disease from environmental noise. *JRC European Commission*.
- Ordoñez Cebrián, P. (2017). *Ultrasonic transducer design: Feasibility as parametric echosounder in shallow water* (Tesis de Master no publicada).
- Ortega, B. P. (2008). *Analysis and enhancement of multiactuator panels for wave field synthesis reproduction* (Tesis de Master no publicada). Universitat Politècnica de València.
- Philip M. Morse, K. U. I. (1968). *Theoretical acoustics*. Mc Graw_HillBookCompany.
- Pierce, A. (2007). Basic linear acoustics. *Springer New York*. doi: 10.1007/978-0-387-30425-0_3
- Pompei, F. J. (2002). *Sound from ultrasound: The parametric array as an audible sound source* (Tesis de Master no publicada). Massachusetts Institute of Technology.
- Prieur, F. (2012). Nonlinear propagation of ultrasonic signals. theoretical studies and potential applications. *University of Oslo*.
- Rayleigh, J. W. S. (1877). *The theory of sound*. Macmillan and Co.
- Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge University Press.
- Rossing, T. (2007). *Springer handbook of acoustics*. Springer.
- Rudenko, O., y Soluyan, S. I. (1977). Theoretical foundations of nonlinear acoustics..
- Saha Ray, S. (2016). New exact solutions of nonlinear fractional acoustic wave equations in ultrasound. *Computers Mathematics with Applications*, 71(3), 859-868. doi: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2016.01.001>
- San Martín, R., Tello, P., Valencia, A., y Marzo, A. (2020). Experimental evaluation of distortion in amplitude modulation techniques for parametric loudspeakers. *Applied Sciences*, 10(6). doi: 10.3390/app10062070
-

- Shigeto Takeoke, Y. Y. (2010). *Acoustic projector using directivity controllable parametric loudspeaker array*. Sydney, Australia: ICA 2010.
- Tan, E.-L., Gan, W.-S., y Yang, J. (2008). Preprocessing techniques for parametric loudspeakers. En *2008 international conference on audio, language and image processing* (p. 1204-1208). doi: 10.1109/ICALIP.2008.4590234
- Westervelt, P. J. (1957). Scattering of sound by sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29(2), 199-203. doi: 10.1121/1.1908830
- Yoneyama, M., Fujimoto, J., Kawamo, Y., y Sasabe, S. (1983). The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 73(5), 1532-1536. doi: 10.1121/1.389414
- Şamil Akçağıl, y Aydemir, T. (2016). New exact solutions for the khokhlov-zabolotskaya-kuznetsov, the newell-whitehead-segel and the rabinovich wave equations by using a new modification of the tanh-coth method. *Cogent Mathematics*, 3(1), 1193104. doi: 10.1080/23311835.2016.1193104
-